

## 目 次

はじめに -----	1
井上 元	
<b>【グループ1：広域グループ】</b>	
G1a-1 (人工衛星データによる地表面解析チーム) 活動要約 -----	5
山口 靖	
陸域生物圏モデル BEAMS を用いたシベリア地域の炭素収支解析 -----	6
佐々井 崇博	
地球温暖化によるレナ川流域の洪水被害の拡大：宇宙からの監視 -----	16
酒井 徹	
G1a-2 (GOSAT データ解析チーム) 活動要約 -----	21
Heon-Sook Kim et al.	
West-Siberian methane flux observation database and methane emission map (version Bc5) -----	22
Shamil Maksyutov and Mikhail Glagolev	
Estimation of West Siberian methane flux: Evaluation of methane emissions from West Siberian wetlands -----	30
Heon-Sook Kim et al.	
シベリアの森林火災発生状況と衛星データを用いたメタン放出量推定 -----	37
小林 菜花子	
G1b (気候解析チーム) 活動の一側面 ー 全球の気候変化におけるシベリア ー -----	45
神沢 博	
動態植生ー凍土複合モデル(DV-FSM)によるタイガ (寒帯林)・凍土結合系 の維持と変動の機構 -----	54
張 寧寧 ほか	

G1c (ロシア政治経済研究チーム) 報告	
— ロシアの政治経済情勢とエネルギー戦略 —	55
杉本 侃	
【グループ2：水・炭素循環グループ】	
G2a (古環境復元チーム) 活動要約	
— 年輪同位体を用いた過去の土壌水分量復元 —	63
杉本 敦子 ほか	
樹木年輪炭素同位体を用いた東シベリアタイガ林の過去の土壌水分量復元	64
鄭 峻介 ほか	
G2b (素過程観測チーム) 活動要約	71
檜山 哲哉	
東シベリアタイガ林における群落スケールの水・炭素循環	72
小谷亜由美・太田岳史	
スパスカヤパッドでの 2010 年融雪水熱収支	80
兒玉裕二 ほか	
東シベリア ヤクーツク近郊の永久凍土帯に分布する湧水の地下水年代	85
檜山 哲哉 ほか	
G2c (モデリングチーム) 活動要約	92
山崎 剛	
陸面モデル 2LM によるタイガ林の水・熱収支シミュレーション	93
山崎 剛	
Spasskaya Pad の CO <sub>2</sub> 収支のシミュレーション	99
朴 昊澤	
分布型水文モデルにおける河川の結氷日・解氷日の推定とその検証	105
八田 茂実	

衛星画像によるヤクーツク周辺の森林変化域判読結果の検討	111
山本 一清	
東シベリアにおける地表面改変が水・熱循環に与える影響	116
吉田 龍平	
【グループ3：人類生態グループ】	
G3a (氷結水環境チーム) 活動要約	125
高倉 浩樹	
氷結水環境における民俗と在来知	126
高倉 浩樹	
シベリアの冬道路と地球温暖化の影響	131
奥村 誠	
G3b (資源動物研究チーム) 活動要約	139
立澤 史郎	
サハ共和国北部におけるトナカイ飼育民と環境変化	141
吉田 睦	
サハ共和国におけるトナカイ牧畜について	150
中田 篤	
野生トナカイの生態変化と先住民社会への影響	160
立澤 史郎	
サハ共和国における毛皮獣狩猟と外来生物問題	176
池田 透	
カムチャッカ沿岸部に居住する先住民の伝統的生業にかんする調査報告	183
永山 ゆかり	

人類のシベリア進出史およびトナカイの消長について -----	190
佐々木 史郎	
G3c (環境認識・政策研究チーム) 活動要約 -----	191
藤原 潤子	
サハ共和国における環境変動と移住問題 -----	192
藤原 潤子	
適応・脆弱性研究のレビュー -----	197
石井 敦	
おわりに -----	203
檜山 哲哉	

## はじめに

井上 元

人間文化研究機構 総合地球環境学研究所  
(シベリアプロジェクト リーダー)

今年度は **FR2** (本研究2年目) にあたり、中間評価の年でもある。そこで今一度、本プロジェクトの目的と構造を掲げ、これまでの研究成果を概観したい。本報告書が、そのための良い材料になることを期待している。

シベリアプロジェクトの目的と構造：

シベリアは温暖化が最も顕著に進行すると予測される地域である。長期的な気温の上昇として表出する温暖化は、短期的には乾燥と湿潤を繰り返しながら、永久凍土と陸域生態系に影響を及ぼす。本研究プロジェクトでは、人工衛星データを用いてシベリアの水・炭素循環の特徴を俯瞰的にとらえ、それらの変動の近未来予測を行い (グループ1：広域グループ)、水・炭素循環の変動要因を現地観測から明らかにし (グループ2：水・炭素循環グループ)、都市と農村の双方において、水・炭素循環の変動や社会変化に対して人々がどのように適応しているのかを見極め (グループ3：人類生態グループ)、今後どのように適応していくのかについて考察を行う。



G 1

【グループ 1 : 広域グループ】





## G1a-1（人工衛星データによる地表面解析チーム）活動要約

山口 靖

名古屋大学大学院 環境学研究科

### 1. 当初の目的

G1a チームは、現在のシベリア地域における水・炭素循環過程を、主に衛星観測とモデルシミュレーションによって明らかにすることを目的としている。その内容は、①シベリア地域の永久凍土帯に生育するカラマツ林の雪氷プロセスを陸域生物圏モデルで再現すること、②雪氷プロセスが炭素収支に与える影響をシベリア地域全体で評価すること、③洪水発生メカニズムを正しく理解し、洪水被害規模の時空間変化特性を評価すること、の3点である。

### 2. 研究の進行状況（研究概要）

研究目的に向けた今年度行った研究概要を以下に記す。

上記①については、ヤクーツク近傍に設置された2つのフラックス観測タワー（YPF・YLF）の観測データを用いて陸域生物圏モデルを検証した。その結果、モデルには寒冷圏特有のプロセスが記述されていないため、地温の季節変化が十分再現できないことがわかった。それを改善するために複数の雪氷プロセスを導入し、大気-植生間のエネルギー交換過程を強化した。結果として、より現実的に地温を再現することに成功した。

上記②では、本プロジェクトで設定するシベリア全域を対象に、①で改良したモデルを使って炭素収支量の広域解析を行った。今年度は、昨年度同様に広域解析用のデータ整備として複数の衛星データを収集し、複数の前処理を行った。更に、それらのデータをモデルインプット用に加工し、モデルの試計算を行った。結果として、シベリア地域の地温やNEPの季節変化を解析する前段階まで到達できた。

上記③については、衛星データを利用したレナ川流域の洪水モニタリングに加え、水位や気温データを用いて洪水被害との関係について解析した。結果として、レナ川流域の上流で気温の上昇傾向が高く、春先に大規模な洪水が発生しやすい環境であることがわかった。また、補正予算を使って、勾配の少ない北極海沿岸域で発生する洪水の現地調査を実施した。

### 3. 今後の課題と展望

上記①については、今後モデル検証を充実させることが最優先課題である。寒冷圏特有の水・エネルギー・炭素循環過程をより詳細に評価するために、今後は「二つの検証サイトで観測されているNEPと地温以外のパラメータを検証すること」と、「ロシアに点在するその他のフラクスタワーデータを可能な限り入手して、検証点を増やすこと」を行う予定である。

上記②については、来年度モデルの本計算を進める。目標は、寒冷圏の雪氷プロセスが炭素収支に与える影響を時空間的に評価することである。そのため、早急に本計算を行って水・エネルギー・炭素フラックスの時空間パターンを把握し、モデル感度解析などの作業へ速やかに移行させたい。

上記③については、洪水の発生する場所の地理的条件やタイミングの僅かなズレによって災害規模は大きく変化する。より正確に災害規模を予測するために、準リアルタイムの災害予測値図（ハザードマップ）を作成する必要がある。また、他のグループと関連して研究を進めていくことによって、洪水被害と人との関わりについての知見を深めていきたい。

# 陸域生物圏モデル BEAMS を用いたシベリア地域の炭素収支解析

佐々井崇博

名古屋大学 大学院環境学研究科 地球環境科学専攻

## 1、はじめに

大気中の二酸化炭素濃度は、地球表層（大気、陸域、海洋間）の炭素収支によって決まる。そのため、温暖化研究において大気-陸域、大気-海洋間の炭素収支量を正確に推定することは非常に重要である。陸域-大気間の炭素収支量は、季節変化の振幅や一年毎の経年変化が非常に大きい。陸域生態系活動は、時間変化の激しい気象・気候変化に強く影響を受けるためだ。もちろん、陸域全体の炭素収支量は、生態系活動だけでなく、土地被覆の不均一性や人為的活動による炭素の排出、植生の多様性など、細かい空間スケールの現象の積み重ねによって変化する。これらのあらゆる陸面プロセスを詳細に把握することが、温暖化メカニズムの解明に大きく寄与するであろう。

これまで、陸域生態系の炭素収支量を広域推定する目的で数多くの炭素収支研究が行われてきた (e.g., Nemani et al., 2003)。しかし、その推定結果は研究によって大きく異なるのが現状である (Cramer et al., 1999, 2001; Gurney et al., 2002)。将来予測の研究では、陸域生態系が今後 100 年間で吸収源であり続けるか、放出源に転換するか、すらわかっていない

(Friedlingstein et al., 2006)。陸域炭素収支のメカニズムは、十分な解明に至っていない、のが現状であろう。

全球炭素収支量の不確定性を高める要因のひとつが、高緯度雪氷圏固有のプロセスである。雪氷圏は、近年の気候変動によってエネルギー収支・水循環が最も大きく変化する地域のひとつとされる (e.g., Sazonova et al., 2004; Euskirchen et al., 2006; Kimball et al., 2006; Lemke et al., 2007)。気候変動に関わる政府間パネル (IPPC) 第四次報告書では、過去 30 年間の昇温率が北半球高緯度で最も大きく、また降水量も同地域で大きく増えたと報告している

(図 1, 2)。更に、今後 100 年間で過去の昇温や降水量の増加傾向がより強まるという予測もある (図 3, 4)。陸域生態系は、植生の光合成活動や土壌微生物の活動を通して気温や降水量の変化には極めて敏感に反応する。その結果、陸域全体の炭素収支量が大きく変化することは容易に想像できる。

近年、気候変動が雪氷圏固有の環境やエネルギー収支、水循環を変化させるという観測事例が数多く報告されている (e.g., JAMSTEC プレスリリース, 2008)。シベリア地域では、気温上昇とともに地温が上昇し、永久凍土の融解が促進され、活動層が年々厚くなっている (図 5)

(JAMSTEC プレスリリース, 2008)。更に、永久凍土は降水量増加によって融解がより促進される。その過程は、「夏季における降水量の増加が土壌水分を増やし、土壌への熱輸送が活発に行われるようになったこと」や「冬季における降雪量の増加によって積雪層が厚くなり、地中熱の発散を抑制すること」が挙げられる。また、活動層は地下部だけでなく地表面の水・エネルギープロセスにも影響を与える。たとえば、地表面温度が 0°C 以下になると活動層内の土壌水分は凍結し、アイスレンズを形成する (図 6)。レンズ状に凍結した土壌は膨張して地表を隆起させ (凍上現象)、地表での積雪層や土壌への熱輸送量を変化させる (Nicolosky et al., 2007a, b)。活動層が厚くなることで地表面がより隆起し、積雪層や熱輸送量をより増加させることも予想される。凍土融解が進行することで地盤沈下や冬季の異常な河川流出が生じるという報告もある (JAMSTEC プレスリリース, 2008)。このように、炭素収支モデルに雪氷プロセスを反映させる上でエネルギー、水収支の高度化は欠かせない。近年の気温上昇や降水量増加が直接的に影響を与えるプロセスが、エネルギー収支、および水循環である。このように雪氷圏の水・エネルギープロセスを随時モデルに導入することが重要であるものの、気候変動が炭素収支量に与える影響を雪氷圏で評価することは非常に難しい。なぜなら、雪氷圏では地上での観測条件が厳しく、雪氷圏固有のプロセスが十分解明されていないためである。今後は、最新の観測研究結果をでき

るだけ準リアルタイムでモデルに導入していくことが、雪氷プロセスをより高度化することにつながるであろう。

永久凍土環境下では、水・エネルギープロセスが活動層や生態系活動を通して炭素収支に影響を与える (Chapin et al., 2005; Hinzman et al., 2005)。本来シベリアは寒冷であるため、生態系活動が最も制限されている地域のひとつである。しかし、近年の気候変動によって生態系活動の制限要因である寒冷条件が大きく緩和され、同地域の生態系活動は活発化の方向にある。既存研究では、衛星リモートセンシングによる植生モニタリングにおいて植生の生長期間が年々延びているという指摘がある (Myneni et al., 1997)。植生活動が活発化すれば光合成活動が促進され、炭素吸収量が増加する方向に働く。植生だけでなく土壤微生物の活動も活発化すれば、有機物の分解が促進され、放出量も増加する方向に働く。永久凍土上の土壤には多量の炭素が貯留されているため、シベリアは他の地域以上に多くの炭素を放出するという予測もある

(Goulden et al., 1998; Piao et al., 2008)。永久凍土が融解した湿地では多量のメタンも放出され、大気へ放出されることで更なる温暖化の加速につながる可能性も指摘されている (文献)。一方で、衛星リモートセンシングの研究では、春の早期化と夏の早魃によって近年植生活動が不活発になってきているという指摘もある (Angert et al., 2005; Bunn and Goetz, 2006)。雪氷圏は、雪氷プロセスを通して温暖化に対するフィードバックが複雑に絡み合っている可能性がある。今後は、フィードバックの一端である雪氷プロセスをより正確にモデルへ導入し、それらのプロセスを独立で評価することで、雪氷圏が炭素収支においてどのような役割を果たすか、を把握する必要であろう。

既存のモデル研究の中で、雪氷圏固有の雪氷プロセスが生態系活動に与える影響を考慮し、広域の炭素収支量を評価した炭素収支モデルの研究はほとんどない。雪氷圏のモデル開発は、エネルギー・水収支モデルが先行的に開発されている (e.g., Takata et al., 2005; Nicolsky et al., 2007a, b)。雪氷圏モデルの特徴は、土壤層や積雪層を多層化した構造にある。多層化の利点は、雪氷プロセスを取り込みやすい点にある。たとえば、Takata et al. (2005)では積雪層を多層化することで融雪プロセスを詳細に再現している。Nicolsky et al. (2007a)では、地温が0°Cとなる土壤層より下で水が凍結すると仮定し、永久凍土や活動層の変化を再現する。そのため、陸域生態系の炭素収支解析を目的とした陸域生物圏モデルでも水・エネルギープールを多層化し、雪氷圏固有プロセスを再現する必要がある。改良した陸域生物圏モデルで炭素収支を解析すれば、高緯度雪氷域における炭素収支量の推定精度を高めるだけでなく、雪氷プロセスと炭素収支量の関係を解明することや、雪氷圏全体が温暖化にどの程度寄与を調べることが期待できる。

そこで、本研究では、G1aグループで独自開発している陸域生物圏モデルBEAMS (Sasai et al., 2005, 2007)を高度化し、雪氷圏特有の水・熱プロセスの再現と活動層の変化が生態系炭素収支に与える影響を評価することを目指す。主な研究の流れは、①モデルの妥当性を確認するために、シベリアのフラックスサイトで観測された気候パラメータを入力値として既存モデルの検証を行う。②モデル出力値である炭素・エネルギーフラックスを観測値と比較し、既存モデルの問題点を選定する。③モデル構造の改良やパラメータの最適化を行い、モデルの推定精度を高める。④広域データの整備⑤構築したモデルを用いて全球の炭素収支量を推定する。本中間成果報告では、①、②、③の一部について示す。

## 2、モデル

本研究では、陸域生物圏モデルBEAMSを用いる。本モデルの特徴は、①衛星データを入力値とする診断型タイプのモデルである、②陸域生態系の炭素・水・エネルギープロセスを再現できる、③光利用効率に植物生理学に基づいた光合成モデル (Farquhar et al., 1980)を組み合わせることでGPPを算出するアプローチを採用している、ことである。

今回は、二つの雪氷-炭素プロセスを改善した。現行モデルでは、①少量でも積雪があれば土壤全体を雪が覆うために土壤分解が行われず、②根の呼吸は積雪に影響を受けない、という二

つの仮定である。しかし、現実的には少量の雪であれば土壌分解量として大気に放出される炭素量がある。また、積雪量が多くても炭素は雪を通して大気に放出される。根の呼吸も分解量と同様に積雪によって抑制される。つまり、現在のモデル結果は、降雪期に土壌分解が過小、植生呼吸が過大評価になっている可能性がある。

そこで、本モデルに雪被覆率を導入し、雪被覆率による土壌呼吸の抑制を再現することを試みた。雪被覆率 (Asn) の導入は、Tanaka et al. (2003)を参考に以下の式を用いた。

$$Asn = \min(\sqrt{S_n/S_{nmax}}, 1.0)$$

$S_n$  は積雪量 (mm)、 $S_{nmax}$  は最大積雪量 (=100 mm) である。積雪量が  $S_{nmax}$  より多い場合は、全土壌が雪に覆われる ( $Asn=1$ )。雪被覆率が 1 より小さい場合は、積雪が地表面に散在することを表す。この雪被覆率から雪に覆われていない地表面を再現し、以下の式で土壌呼吸 (分解量 + 根呼吸) との関係を持たせた。

$$SD *= (1-Asn)$$

$$Ra\_root *= (1-Asn)$$

更に、低温時の光合成パラメータを調整した。既存モデルでは気温が 0°C を下回ると植生活動は抑制され、光合成を行わないと仮定していた。しかし、高緯度寒帯地域の植生は、0°C 以下の環境でも光合成が行われるという観測結果があるため (文献)、気温が -8°C 以上であれば光合成活動によって炭素が吸収するようにパラメータを調整した。

### 3、モデル検証

本プロジェクトの G2 が観測している 2 点のフラックスサイトで、モデル検証を行う (図 7)。一つ目のサイトは、Yakutsk Pine Forest Site (YPF) である。場所は、62° 14' 29' N、129° 39' 02' E にある。植生種はアカマツ (常緑針葉樹林)、標高は 220m。年間平均気温は -8.5°C、年間降水量は 388mm 程度である。二つ目は、Siberia Yakutsk Larch Forest Site (YLF) である。場所は、62° 15' 18' N、129° 14' 29' E。植生種はカラマツ (落葉針葉樹林)、標高は 220m。年間平均気温は -10.9°C、年間降水量は 388mm 程度とされる。検証用データは、Asiaflux の web サイト

(<http://asiaflux.yonsei.kr/index.html>) から入手した。モデルの入力パラメータとして、気温 (°C)、下向き短波放射 (N/m<sup>2</sup>)、水蒸気圧 (hPa)、風速 (m)、アルベド (-)、地表面温度 (°C) の 30 分値を前処理し、1 ヶ月平均値のデータとして使用した。欠損値の gap-filling は線形補完を用いた。fPAR (-)、LAI (-)、降水量 (mm) の実測値は入手できなかったため、fPAR、LAI は衛星データ MOD15A2、及び MYD15A2、降水量は NCEP/NCAR 再解析データを用いた。検証用のフラックスデータは、30 分値を Hirata et al. (2008) の方法で gap-filling し、1 ヶ月積算値に処理した。対象とするフラックスは、NEP である。両サイトとも、検証データは 2004 年の 1 年分のデータを用いる。ただし、YLF では 2003 年の気象データが入手できたため、Spin-up 用データとして 2003 年のデータを使用する。森林の樹齢を 50 年と仮定し、Spin-up では初年で樹齢 50 年での初期値が求まるように計算条件をつけて炭素フラックスを計算した。

検証結果では、両サイトとも NEP の推定値が 6 月のピークで過大、冬季で全体的に過小評価となった (図 8)。既存モデルと改良モデルを比較すると、雪被覆率は積雪がある冬季のみ影響があるため、6 月の過大評価にはあまり影響がなかった。一方、冬期の過小評価はより強い過小評価になった。特に、10 月は両サイトとも NEP が大きく減少し、観測値からより遠のいたことがわかる。雪被覆率の導入によって根呼吸が減少、土壌分解量が増加したこと (図 9) を考慮すると、10 月は積雪が根の呼吸を抑制する効果よりも雪に覆われていない地表面で土壌分解量を行わせる効果の方が上回ったと考えられる。部分的に増減パターンが一致していないため、この部分の精度を向上させる必要がある。また、今回の解析で補助的に地温の比較を行ったところ、モデル推定結果と観測値との間に大きな差があることがわかった (図 10)。エネルギー・水プロセスをより正確に再現するためには、モデルの

多層化が有用だと考えられる。NEPの精度向上とあわせて、今後の課題としたい。

#### 4、まとめ

YLF、YPFの2サイトでのモデルの検証と、モデルの高度化を行った。その結果、夏期は過大評価、冬季は過小評価という結果となった。また、積雪量に応じて土壌呼吸を行わせるために、雪被覆率を導入した結果、特に秋は地上観測とより合わない方向へ動いた。より観測値に近づけるためには、雪被覆率の精度改善や、雪氷プロセスの導入、モデルの多層化といった大幅な改善が必要であると考えられる。具体的には、積雪層、土壌層を多層化し、熱伝導方程式を導入することで、層の熱貯留量に応じて地温を決定する。永久凍土の境界条件を設けて、活動層の変化、活動層内の水・熱プロセスをより現実的に再現させる予定である。また、今回はNEPのみを検証パラメータとしたが、推定結果との不一致の原因を把握するためにはGPPや潜熱・顕熱など、他のフラックスも同時に検証する必要があるであろう。

モデル改良後は、シベリア全域（北緯40°～75°、東経30°～160°）を対象に（図11）、2001年～現在までの広域炭素収支解析を行う。主な入力データは、MODISプロダクト（衛星データ）であるfPAR、LST、LAIデータセット、植生分類図、NCEP再解析データ（気候データ）である気温、降水量、水蒸気圧、下向き短波放射、風速データ、地表面の観測データである土地分類図、CO<sub>2</sub>濃度、標高データである。計算資源が限られているため、モデルの技術的作業にも取り組む。主に、プログラムの並列化と領域計算への対応を行う。時間分解能は月別を予定している。広域で炭素・水・エネルギーフラックス収支を推定し、時空間パターンを把握する。永久凍土分布や温暖化がフラックス収支に及ぼす影響を評価する。入力値に対する感度解析を行い、各要素がフラックス収支に及ぼす影響を評価する。

#### 引用文献

Nemani, R.R., Keeling, C.D., Hashimoto, H., Jolly, W.M., Piper, S.C., Tucker, C.J., Myneni, R.B. and Running, S.W. (2003) Climate-driven increase in global terrestrial net primary production from 1982 to 1999. *Science*, 300, 1560-1563, doi: 10.1126/science.1082750.

Cramer, W., Kicklighter, D.W., Bondeau, A., Moore, B.I., Churkina, G., Nemry, B., Ruimy, A., Schloss, A.L. and Potsdam (1999) Comparing global NPP models of terrestrial net primary productivity (NPP): overview and key results. *Global Change Biology*, 5 (Suppl.1), 1-15.

Cramer, W., Bondeau, A., Woodward, F.I., Prentice, I.C., Betts, R.A., Brovkin, V., Cox, P.M., Fisher, V., Foley, J.A., Friend, A.D., Kucharik, C., Lomas, M.R., Ramankutty, N., Sitch, S., Smith, B., White, A. and Young-Molling, C. (2001) Global response of terrestrial ecosystem structure and function to CO<sub>2</sub> and climate change: results from six dynamic global vegetation models. *Global Change Biology*, 7, 357-373.

Gurney, K.R., R.M. Law, A.S. Denning, P.J. Rayner, D. Baker, P. Bousquet, L. Bruhwiler, Y.-H. Chen, P. Ciais, S. Fan, I.Y. Fung, M. Gloor, M. Heimann, K. Higuchi, J. John, T. Maki, S. Maksyutov, L. Masarie, P. Peylin, M. Prather, S. Taguchi, T. Takahashi, and C.-W. Yuen (2002) Towards robust regional estimates of CO<sub>2</sub> sources and sinks using atmospheric transport models. *Nature*, 415, 626-630.

Friedlingstein, P., P. Cox, R. Betts, L. Bopp, W. Von Bloh, V. Brovkin, P. Cadule, S. Doney, M. Eby, I. Fung, G. Bala, J. John, C. Jones, F. Joos, T. Kato, M. Kawamiya, W. Knorr, K. Lindsay, H. D. Matthews, T. Raddatz, P. Rayner, C. Reick, E. Roeckner, K.-G. Schnitzler, R. Schnur, K. Strassmann, A. J. Weaver, C. Yoshikawa, and N. Zeng (2006) Climate Carbon Cycle Feedback Analysis: Results from the C4MIP Model Intercomparison. *J. Climate*, 19, 3337-3353.

Sazonova, T.S., V.E. Romanovsky, J.E. Walsh, and D.O. Sergueev (2004) Permafrost dynamics in the 20th and 21st centuries along the East Siberian transect. *Journal of Geophysical Research-Atmospheres*, 109 (D1).

Euskirchen, E.S., A.D. McGuire, D.W. Kicklighter, Q. Zhuang, J.S. Clein, R.J. Dargaville, D.G. Dye, J.S. Kimball, K.C. McDonald, J.M. Melillo, V.E. Romanovsky, N.V. Smith (2006) Importance of recent shifts in soil thermal dynamics on growing season length, productivity, and carbon sequestration in terrestrial high-latitude ecosystem, *Global Change Biology*, 12, 731-750, doi:10.1111/j.1365-2486.2006.01113.x.

Kimball J S, McDonald K C and Zhao M (2006) Spring thaw and its effect on northern terrestrial vegetation productivity observed from satellite microwave and optical remote sensing. *Earth Interactions*, 10, 1–22.

Lemke, P., J. Ren, R.B. Alley, I. Allison, J. Carrasco, G. Flato, Y. Fujii, G. Kaser, P. Mote, R.H. Thomas and T. Zhang (2007) Observations: Changes in Snow, Ice and Frozen Ground. In: *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

JAMSTEC プレスリリース (2010) シベリアの凍土融解が急激に進行 ～地中の温度が観測史上最高を記録し地表面で劇的な変化が発生～[http://www.jamstec.go.jp/j/about/press\\_release/20080118/](http://www.jamstec.go.jp/j/about/press_release/20080118/),

Nicolsky, D.J., V.E. Romanovsky, G.S. Tipenko, and D.A. Walker (2008) Modeling biogeophysical interactions in nonsorted circles in the Low Arctic. *Journal of Geophysical Research*, 113, G03S05, doi:10.1029/2007JG000565.

Chapin, F.S. III, M. Sturm, M.C. Serreze, J.P. McFadden, J.R. Key, A.H. Lloyd, A.D. McGuire, T.S. Rupp, A.H. Lynch, J.P. Schimel, J. Beringer, W.L. Chapman, H.E. Epstein, E.S. Euskirchen, L.D. Hinzman, G. Jia, C.-L. Ping, K.D. Tape, C.D.C. Thompson, D.A. Walker, and J.M. Welker (2005) Role of land-surface changes in Arctic summer warming. *Science*, 310, 657-660, doi:10.1126/science.1117368.

Goulden, M.L., S.C. Wofsy, J.W. Harden, S.E. Trumbore, P.M. Crill, S.T. Gower, T. Fries, B.C. Daube, S.-M. Fan, D.J. Sutton, A. Bazzaz, and J. W. Munger (1998) Sensitivity of boreal forest carbon balance to soil thaw. *Science*, 279, 214-217.

Piao, SL, Ciais P, Friedlingstein P, Peylin P, Reichstein M, Luysaert S, Margolis H, Fang JY, Barr L, Chen AP, Grelle A, Hollinger D, Laurila T, Lindroth A, Richardson AD, Vesala T (2008) Net carbon dioxide losses of northern ecosystems in response to autumn warming. *Nature* , 451, 49-52

Angert, A., S. Biraud, C. Bonfils, C.C. Henning, W. Buermann, J. Pinzon, C.J. Tucker, and I. Fung (2005) Drier summers cancel out the CO<sub>2</sub> uptake enhancement induced by warmer springs. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 102, 10823–10827.

Bunn, A.G. and S.J. Goetz (2006) Trends in satellite observed circumpolar photosynthetic activity from 1982-2003: The influence of seasonality, cover type and vegetation density. *Earth Interactions*, 10, 1-19.

Takata K., S. Emori, and T. Watanabe (2002) Development of the minimal advanced treatments of surface interaction and runoff. *Global and Planetary Change* 38 (2003) 209–222.

Farquhar, G., S. von Caemmerer, and J. Berry (1980) A biochemical model of photosynthesis CO<sub>2</sub> fixation in leaves of C<sub>3</sub> species. *Planta*, 149, 78–90.

Sasai, T., K. Ichii, Y. Yamaguchi, and R.R. Nemani (2005) Simulating terrestrial carbon fluxes using the new biosphere model BEAMS: Biosphere model integrating Eco-physiological And Mechanistic approaches using Satellite data. *Journal of Geophysical Research*, 110, G02014. doi:10.1029/2005JG000045.

Sasai, T., K. Okamoto, T. Hiyama, and Y. Yamaguchi (2007) Comparing terrestrial carbon fluxes from the scale of a flux tower to the global scale. *Ecological Modelling*, 208, 135-144, doi:10.1016/j.ecolmodel.2007.05.014.

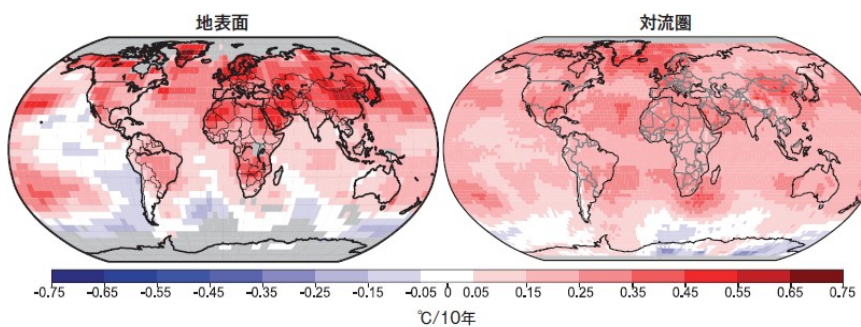


図1 地表面と対流圏の1979年～2005年の気温の変化傾向の分布 (°C 変化)

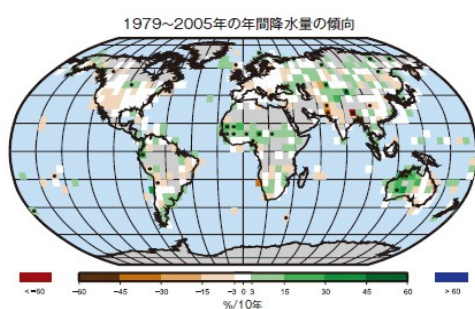


図2 1979年～2005年の年間降水量の変化傾向の分布 (%変化)

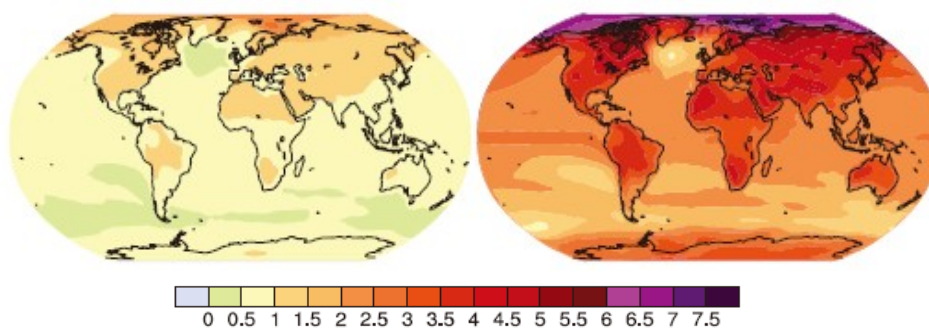


図3 1980～1999年を基準とした21世紀初頭及び21世紀末の地上気温変化の予測 (°C 変化)

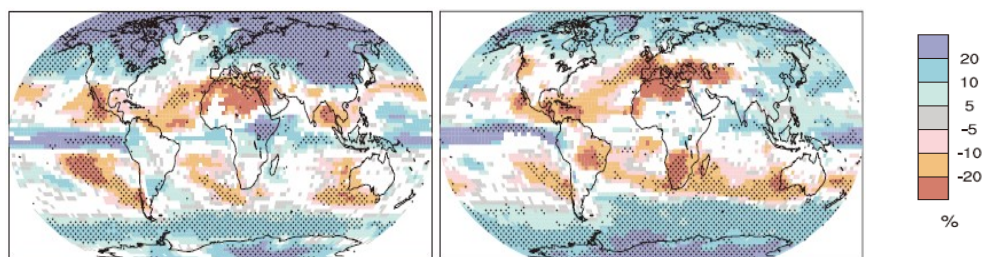


図4 1980～1999年を基準とする2090～2099年の降水量の変化予測 (%変化)



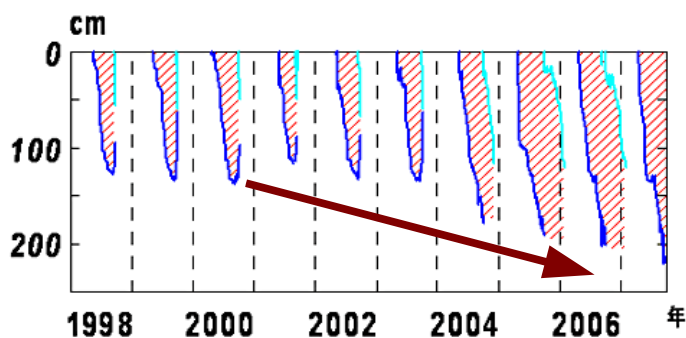


図5 シベリア永久凍土の活動層深度の経年変化

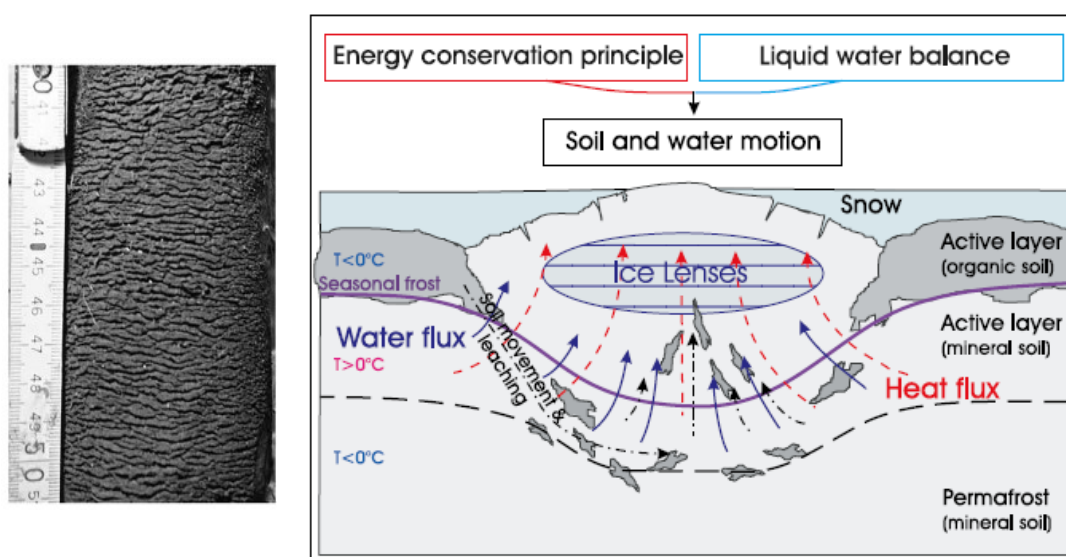


図6 アイスレンズ形成による地表面隆起と水・熱輸送の模式図



図7 検証フラックスサイトの位置

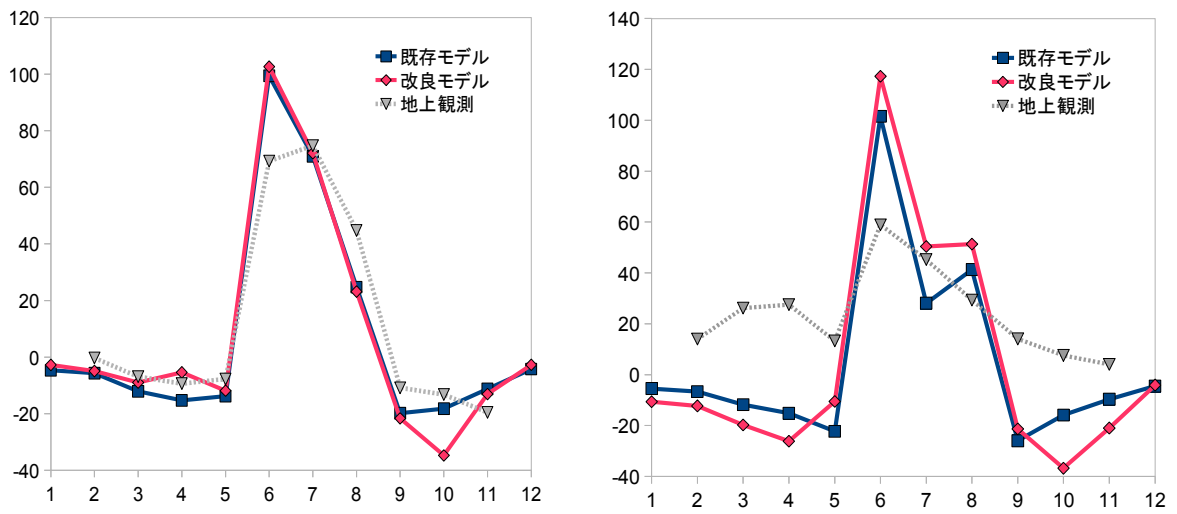


図8 YLF (左)と YPF (右)サイトの NEP 推定値と地上観測値の比較

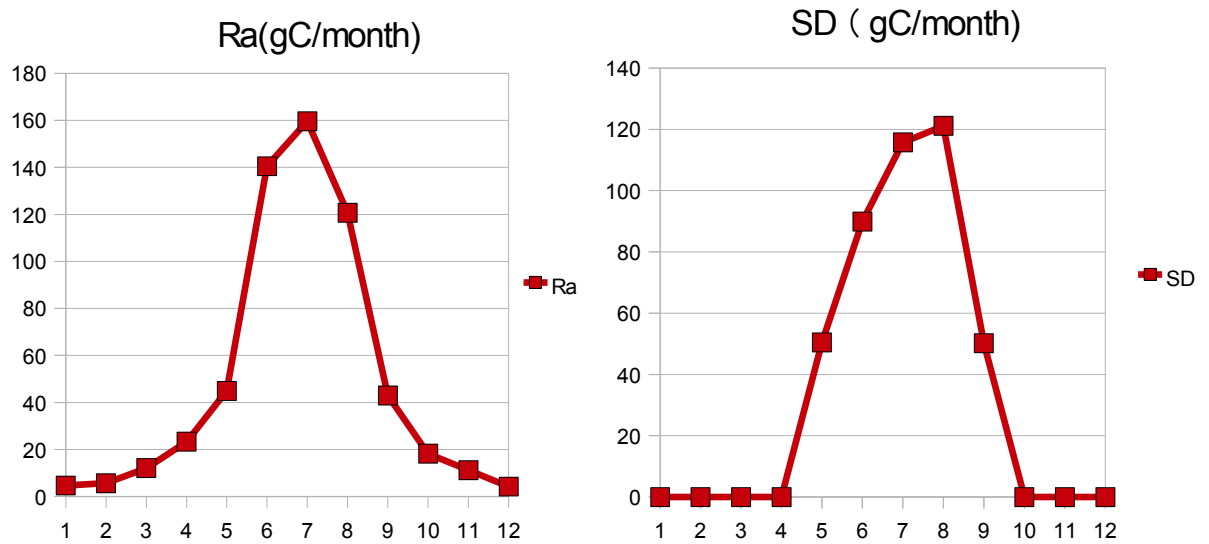


図9 YLF サイトにおける植生呼吸量と土壌分解量の推定値

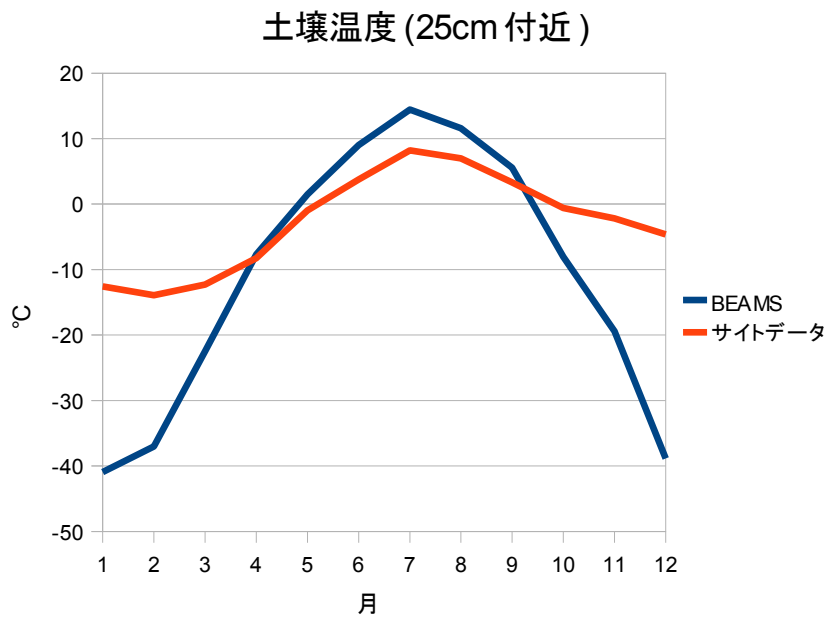


図 10 YLF サイトにおける深度 25cm 付近の地温。モデル推定値と観測値との比較

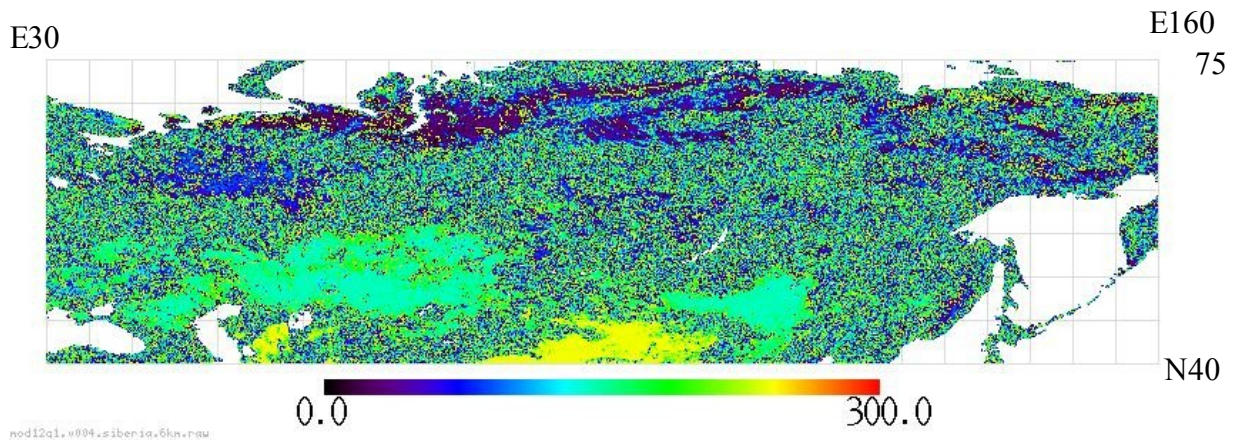


図 11 広域解析の対象地域

# 地球温暖化によるレナ川流域の洪水被害の拡大：宇宙からの監視

酒井 徹

人間文化研究機構 総合地球環境学研究所

## 1 はじめに

最近、暑くなったと感じている人は多いのではないだろうか。毎年夏になると日本各地で最高気温の記録が立て続けに更新され、北海道でも1日の最高気温が35°Cを超える猛暑日が観測されるようになった。こうした温暖化は地球全体で着実に進行している。「気候変動に関する政府間パネル」の報告によると、これまでの100年で地球の年平均気温は0.74°C上昇し、これからの100年で1.1~6.4°C上昇すると予想されている（IPCC 2007）。私たちは、今、地球温暖化の真っ只中にいて、実際にそれを肌で感じているのだ。

ご存じの通り、地球温暖化は二酸化炭素やその他の温室効果ガスが大気中に排出されることによって起こる。温室効果ガスには地球が放射する赤外線を吸収する性質があるため、温室効果ガスの増加とともに気温は上昇する。しかし、地球温暖化は単に気温を上昇させるだけではない。気温の上昇により、水の蒸発、凝結や降雨などの水循環過程にも大きな影響を及ぼす。地球の年平均気温がたった1°C上昇するだけで局所的な集中豪雨や少雨を引き起こし、これまで稀であった異常気象の発生頻度を急増させているのだ。結果として、洪水、干ばつ、森林火災などの水に関する気象災害が地球温暖化の影響によって世界各地で発生している。こうした気象災害の多くは、大気や水が循環する過程で直接的、あるいは間接的に起こる。そのため、地球温暖化に起因する気象災害であっても、発生する災害の種類、原因、規模は一様でなく、それぞれの地域の地理的、社会的な条件によって異なる。気象災害の発生予測や予防のために、その災害に関するデータを集め、災害の発生メカニズムを正しく理解し、限界点（閾値）を明らかにする必要がある。そして、今後さらなる悪化が懸念される地球温暖化問題に対していかに対処すべきかを考える必要がある。

北半球の高緯度に位置するシベリア地域では温暖化の影響が顕著に現れており、既にいくつかの気象災害の出現が報告されている。ここでは、実際に温暖化がどの程度シベリア地域で起きているのか、そして、それが気象災害の出現とどう関係しているのか、レナ川の洪水を例としてご紹介する。

## 2 レナ川の洪水と災害

ロシア連邦東部を流れるレナ川は、ユーラシア大陸で最大・最長の河川である（図1）。バイカル湖西岸の山脈から流れ出し、シベリアを北上して北極海に流れ込む。鉱物資源が豊富のため、レナ川中流のヤクーツクをはじめとして河港が多い。北半球特有の寒冷・乾燥の大陸性気候で、冬の気温は-20~-40°Cまで下がる。一方、夏の気温は30°Cを超えることもあり、夏と冬の気温差が大きい。また、全長4400kmの河川が南北に流れているため、上流と下流でも気温の差がある。レナ川上流のレンスクでは年平均気温が-5°Cであるのに対し、中流のヤクーツクでは-7°C、下流のザーザンでは-10°Cである。低緯度に位置する上流域の方が気温が高い。そのため、レナ川の氷の融解は春から初夏にかけて上流から始まる。そして、氷の融解が始まる前に上流から大量の融解水が短時間のうちに流れ込んでくると洪水が発生する。レナ川はもともと洪水の発生しやすい地理的環境下にある。しかし、洪水が発生したからといって災害



図1 レナ川流域と気象観測所

が発生するわけではない。沿岸の村の住民は洪水の自由な氾濫に任せ、洪水が運んでくる肥沃な土壌を利用して農業生産を行うなど、必要にして十分な範囲で洪水とうまく適合した生活を送っている。それが、ここ最近の地球温暖化の影響で洪水被害が広域化(冠水面積が拡大する)、常在化(いつでも起こる)、長期化(なかなか復旧できない) するようになって、洪水が災害へと変わり始めた。

レナ川上中下流域の年平均気温の変化をまとめたものが図2である (<http://www7.ncdc.noaa.gov.CDO/>)。いずれの地域でも長期トレンドとして年平均気温は上昇傾向にある。グラフを細かく見ていくと、実際の気温は滑らかに上昇するのではなく、年によって大きな山と谷がある。極端に年平均気温が高い山の年は異常高温の発生頻度が高く、そのため、気象災害が発生しやすい。例えば、2001年のレンスクでは村の98%が水没し、住民の80%が被災するほどの記録的な大洪水が発生した。春先の異常高温で氷の融解が促進したためだと考えられる。温暖化にともなう局所的な異常気象の増加によって、洪水被害が拡大しているのを実際の被害状況が裏付けている。また、図2にはもう一つの興味深い現象が映し出されて

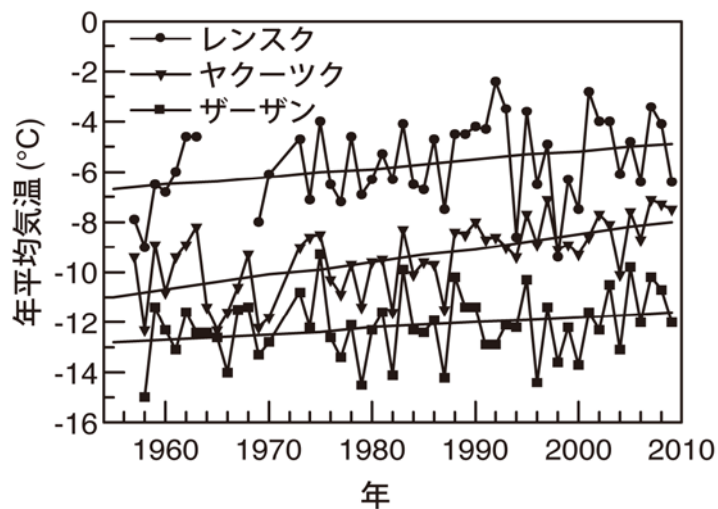


図2 レナ川上中下流域における年平均気温の推移

いる。レナ川流域全体で温暖化が進む。レナ川流域全体で温暖化が進行しているのは間違いないが、その進行速度が地域によって異なっているのだ。下流のザーザン (0.0233°C/年) では遅く、上流のレンスク (0.0341°C/年) や中流のヤクーツク (0.0545°C/年) では早いスピードで温暖化が進行している。図3はレナ川流域内にあるすべての気象観測所の緯度と温暖化速度との関係を表したものである。やはり、低緯度に位置するレナ川上中流域で温暖化速度が速い。これは、レナ川上中流域で融解時期が早まり、融解量が増加する傾向にあることを意味している。このまま温暖化が進行し、レナ川流域内の温度差が拡大し続けていけば、かつて経験したことがない大洪水に襲われる危険がある。

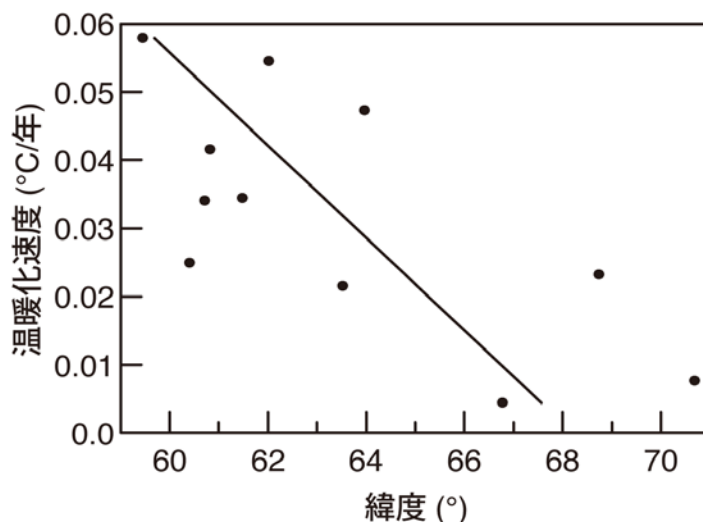


図3 レナ川流域における緯度による温暖化速度の違い

また、レナ川の洪水が災害へと変化したもう一つの要因として、一部の沿岸都市への人口集中の影響が挙げられる。表1は過去5年間のロシア連邦全体の人口とサハ共和国の首都であるヤクーツクの人口の推移をまとめたものである (<http://dvor.jp>)。ロシアでは1990年代から新生児出生数が減少しており、ロシア連邦全体の人口は減少傾向にある。極東・シベリア地域でも人口は減少傾向にあるが、ヤクーツクでは周辺都市からの人口移入によって5年間で12% (28509人) の人口が増加した。そのため、これまで人が住まなかった低地や氾濫原などの災害危険地帯にも住居を構えるようになってきている。このような状況下では、例年通りの規模の洪水が発生したとしても、洪水被害は拡大する。洪水被害が拡大するかどうかは外力の大きさだけでなく、拡大要因が存在するかどうかによって決まる。都市部への人口集中と土地利用状態の変化は洪水被害を拡大させる大きな要因になり得る。ヤクーツクの人口集中と温暖化との関係は不明だが、温暖化による洪水規模の拡大によって、洪水被害のさらなる拡大が懸念

表1 ロシア連邦とヤクーツクの人口推移 (2005-2009年)

年	ロシア連邦	ヤクーツク
2005	143474219	235560
2006	142753551	239225
2007	142220968	245615
2008	142008838	255784
2009	141903979	264069

される。

### 3 宇宙からの監視（リモートセンシング）

地球温暖化によってレナ川流域の洪水被害が拡大傾向にあるのは疑いようのない事実である。しかし、洪水被害の拡大には様々な要因が複雑に絡み合っているため、そして、洪水被害の状況を統計的に整理したデータがほとんどないため、現時点で温暖化がどの程度寄与しているかの判断が下せる状態にない。まずは、洪水の被害状況を明らかにする良質なデータベース（時間スケール、空間スケール、局所的か分散的かなど）を作成することから始める必要がある。その際、上述したように、レナ川の洪水発生には上下流問題が存在するので、上流から下流に至るまで視野を広げて捉え、流域全体の連続性を考慮して評価することが重要になる。そこで、レナ川流域のような広域なエリアを対象とした解析には、人工衛星による宇宙からの監視（リモートセンシング）が有効な手段になる。

リモートセンシングとは、「対象物から反射・放射した電磁波を測定することで、遠く離れたところから対象物の性質を調べる技術」をいう。その利点として、現地に行かなくても地表面の情報を繰り返し、長期に渡って観測できることが挙げられる。人工衛星から観測した画像を地上で受信し、コンピュータを使って解析することで、レナ川流域全体の洪水被害状況を把握することができる。近年の技術的進歩により、様々な人工衛星から洪水被害状況を把握することが可能になっている。例えば、図4に示すのは、米国地質調査所（USGS）が提供する Landsat TM/ETM+画像である。Landsat 衛星は 1972 年に打ち上がってから、センサの改良を続けながら今でも観測を続けている。空間解像度が 30m であり、現在無償で手に入る衛星画像のうち最も空間解像度が高い。運良く、ヤクーツク周辺において洪水が発生している様子を 3 日間連続して観測することができた。2007 年 5 月 13 日にはまだ氷で覆われていたのが（図 4a）、5 月 14 日には上流から融解水が流れ込んできたために河岸段丘の低地で氾濫原が広がった（図 4b）。洪水発生前に約 1km だった川幅が、洪水発生後には最大で 12km まで拡大した。そして、5 月 15 日には川上の氷がすべて下流へと押し流されていった（図 4c）。僅か 1 日か 2 日の間に大規模な洪水が発生したのが見てとれる。しかし、Landsat 衛星は光学センサを搭載しているため、雲の被覆があると地表の状

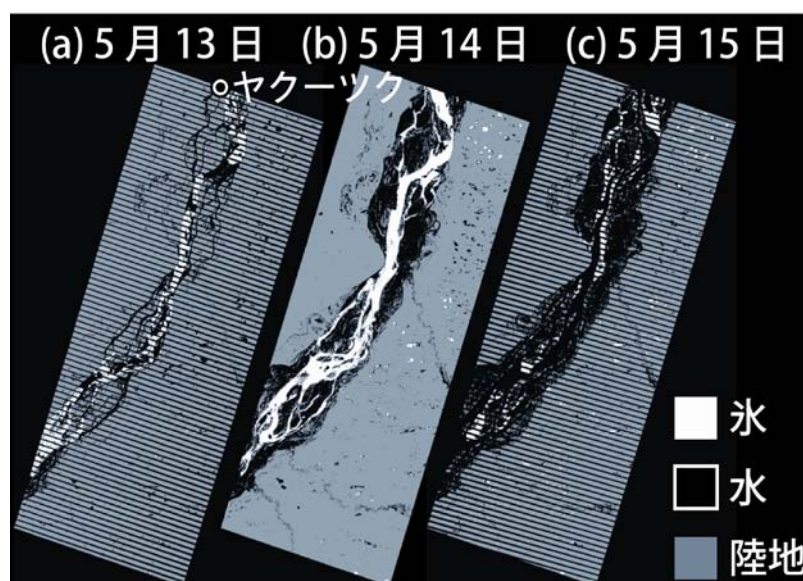


図4 Landsat TM/ETM+から見た洪水被害の様子（2007年5月13-15日）

況を正しく観測することができない。シベリア地域のような雲の出現頻度が高い気候帯に属していると、データの欠落といった解析以前に困難な問題が存在する。2006年に打ち上げられた国産衛星「だいち（ALOS）」は雲を透過して地表の情報を観測できるマイクロ波センサ（PALSAR）を搭載している。そのため、天候に左右されず地表面を観測することができる。センサの特性が異なる複数の人工衛星のデータを組み合わせて解析することで、レナ川流域全体の洪水被害状況を詳細に把握することができる。リモートセンシングに基づく準リアルタイムの災害予測地図（ハザードマップ）の利用は、洪水被害の軽減・防止対策として期待される。大規模な洪水が発生した時、堤防やダム貯水池などの構造物による防災では不十分である。適切なタイミングで災害情報を提供することで、洪水に対して極度に脆弱な地域の土地利用規制を行い、住民を安全な場所へと避難させることができる。例え僅かな時間でも洪水が発生する前に有効な対策を進めることが、起こってから被害の軽減に寄与する。宇宙からのレナ川流域の監視は、今後の洪水被害対策に必要不可欠といえる。洪水の被害予測を正確、迅速、詳細に発信し、地域住民と行政機関とが連携して意志決定を行うシステムを構築することが防災や減災に繋がると信じている。

## 参考文献

IPCC (2007): Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Solomon S, Qin DH, Manning M, Chen Z, Marquis M, Averyt KB, Tignor M, Miller HL (eds). Cambridge University Press: Cambridge, UK and New York, USA.



## G1a-2 (GOSAT データ解析チーム) 活動要約

### Estimation of Siberian methane flux from wetlands and wildfires

Heon-Sook Kim<sup>1</sup>, Nakako Kobayashi<sup>1</sup>, Shamil Maksyutov<sup>2</sup> and Gen Inoue<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Research Institute for Humanity and Nature

<sup>2</sup>National Institute for Environmental Studies

CH<sub>4</sub> emission from West Siberian wetlands was estimated at 0.5° resolution, using in situ measurements of 30 sites for bioclimatic zones covering the whole West Siberia and a detailed wetland classification (Glagolev et al. 2010). The estimated CH<sub>4</sub> emission from West Siberian wetlands of 3.3 Tg/yr is smaller with its different north-south gradient as compared with Matthews and Fung (1987). To understand the seasonal cycle of West Siberian CH<sub>4</sub> fluxes, this study estimates West Siberian CH<sub>4</sub> flux through inverse modeling with the updated CH<sub>4</sub> emission from West Siberian wetlands. The CH<sub>4</sub> emissions from the extensive wetlands mainly determines the seasonal cycle of West Siberian CH<sub>4</sub>. Inverse modeling called a top-bottom approach has been introduced as a tool for evaluating and refining emission estimates using atmospheric CH<sub>4</sub> measurements. Two airborne measurements of CH<sub>4</sub> over West Siberia are used in this inverse modeling. To evaluate the updated emission of Glagolev et al. (2010), its inversion results are compared with those for Fung et al. (1991), which emission inventory are estimated using both emission seasons and emission rates for forested and nonforested bogs based on the climatology of monthly surface air temperature and precipitation with a few measured CH<sub>4</sub> flux. Both inversions estimate a similar seasonal cycle of West Siberian CH<sub>4</sub> flux with a similar annual flux and it suggests that this inverse modeling is a robust method on flux estimates. The annual West Siberian CH<sub>4</sub> flux is estimated to be 7.3 Tg/yr using the updated emission inventory, which is 81% of the prior flux. While 8.4 Tg/yr of the annual mean flux estimated using the emission inventory of Fung et al. (1991) is only 55% of the prior flux and it suggests the overestimated wetland emissions in Fung et al. (1991) due to the spatio-temporal extrapolation of emission rates from the limited field measurements for wetland types based on the simplified wetland classification.

Most important process driving carbon dynamics in natural ecosystem in Siberia is forest fire. Recent change in the occurrence of wildfires in Siberia was investigated. During the period between last half of 1990s and 2010, region affected by massive wildfires has expanded toward north. There are vagrant points of view about future prospects; some insist that higher temperature will bring down the increase in wildfire incidence, but some are thinking that more precipitation will decrease the incidence at high latitudes. Recently observed tree mortality due to insect outbreak and excessive wetness is also important factor, which should determine the wildfire recurrence. Forecast the future of wildfires in Siberia can be facilitated by analysing degree and extent of the tree damage due to wetness after 2006 and insect outbreak in 2010 around Yakutsk and by comparing with the past. On the other hand, the study aiming to accurately quantify the emission amount of green house gases from wildfires is underway. Methane is the main target because of the high uncertainty in the current estimation. GOSAT CO<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub> data analysis can help reducing the uncertainty. Since first data release in the autumn of 2009, problems in retrieval of GOSAT data have been solved one by one, and significant improvement was achieved recently. Although the uncertainty of absolute value still remains, careful analysis revealed that the ratios of CO<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub> concentration reflect the concentration increase due to gas emissions from wildfires. Next step is the calculation of methane emission ratios by combining the observation and model estimation of CO<sub>2</sub> concentration.

# West-Siberian methane flux observation database and methane emission map (version Bc5)

Shamil Maksyutov

Center for Global Environmental Research, National Institute for Environmental studies, Tsukuba, Japan

Mikhail Glagolev

Dep. Soil Science, Moscow State Univ, Moscow, Russia

## 1 Introduction

Methane is important for the photochemistry of the atmosphere and is a greenhouse gas in the climatic system. In terms of the direct potential of global warming, methane exceeds CO<sub>2</sub> 39 times (over a period of 20 years) (Karol, 1996). Therefore, the dynamics of its concentration in the atmosphere is taken into consideration in modern climatic models (see Krupchatnikov et al, (2004) and references therein). In such models, the equation of the atmospheric transfer of methane obligatorily includes in a certain form the term describing the surface source of CH<sub>4</sub>. Among all possible sources of methane, the principal role belongs to mires. The flux of CH<sub>4</sub> from all mires of the world is, according to various authors, from 92 to 110 Tg/year. About 60% of global emission from swamps is from within the zone from 50° to 70° N. The contribution of swamps to global emission from the territory of the former USSR is 11 Tg/year (i. e., 19–20% of the whole CH<sub>4</sub> flux from the country's territory). It is assumed that the mires of Western Siberia contribute almost 1/3 of the CH<sub>4</sub> flux from all mires of the country. However, the estimations available today cannot be considered reliable. At present, among all the regions of Russia, Western Siberia is leading the way in the quantity of experimental data on the methane flux from mires. However, even in this, best studied, region the estimations of annual CH<sub>4</sub> emission differ greatly between studies. The aim of the cycle of our recent investigations is *the verification of the regional estimation of methane emission from the territory of Western Siberia*. The present study is aimed at the value estimation of specific fluxes of methane characteristic for Western Siberia and at the unification of diverse information on emissions within the emission inventory.

## 2. Emission inventory

### 2.1 The concept of the emission inventory

The modern approaches to determining the output of natural methane sources based on solution methods of either direct or inverse tasks of mathematical modeling (Bousquet et al, 2006). The conclusion is made that in both cases even a very approximate estimation of geographic distribution of emission is useful.

We suggest the following estimation (obtained on the basis of monitoring data for the typical methane producing ecosystems of all natural zones of Western Siberia) and construct the emission inventory. It comprises three principal elements (for each natural zone):

- (1) duration of the periods of methane emission (DPME);
- (2) the area of various types of mires and the ratio of micro-landscapes in them;
- (3) the set of distributions of densities of probabilities in specific methane fluxes in typical ecosystems of the zone.

The emission inventory is continuously improving with the appearance of new monitoring data. For convenience, it was suggested to designate the versions of the emission inventory with a three digit code in which the first digit (*a capital letter of the Latin alphabet*) determines the type of model and corresponds to the accepted in this model set of DPME; the second digit (*a lowercase letter of the Latin alphabet*, a class of the model) is a set of areas of various types of mires and the ratio of elements of micro-landscapes in them; the third one (*a digit*, the series of the model) is the system of statistical characteristics of typical specific fluxes.

### 2.2 The history of creation and development of the emission inventory

In detail, the methodic and methodological grounds of emission inventory up to and including the version Aa3 are described in (Glagolev, 2008). In class “a” models, the lowest spatial units were swamp districts discerned according to (Liss, et al, 2001) (thus the average area of a spatial unit was on the order of 100000 km<sup>2</sup>). The distribution of six classes of characteristic ecosystems (frozen hillocks, ridges and high bogs, intraswamp lakes, oligotrophic hollows, mesotrophic and eutrophic fens) by the types of swamp complexes for different natural zones in these models was taken from (Peregon et al, 2005, 2008). The transition to class “b” models was made principally on the basis of the study (Peregon et al, 2008): the mean areas of a spatial unit decreased approximately to 1400 km<sup>2</sup> and the quantity of typical ecosystems was increased to

eight as “ridges” and “ryams” (ryam— oligotrophic bog) were discerned separately from the previously single class “ridges and ryams”, as a new “floating mats” class was introduced. In brief, model Ab4 is described in (Glagolev et al, 2009).

To this point only a part of experimental data, on the basis of which the emission inventory was constructed, has been published: the data on methane emission in forest tundra (Glagolev et al, 2009), in north taiga (Kazantsev et al, 2009), and some data on middle taiga (Glagolev et al, 2008).

In version Bc5 not only a new set of experimental data is taken into consideration but also the following important changes are introduced in comparison with previous versions:

- more precise dates of the beginning and the end of the summer-autumn period in natural zones of Western Siberia are introduced (after Rikhter, (1963));
- the natural zone boundaries of Western Siberia are made more precise (after Gvozdetskii et al, 1973, Liss et al, 2001);
- the emission of methane from swampy habitats in the steppe zone is taken into consideration;
- actual data for the tundra zone of Western Siberia are used (previously, in the emission inventory the results obtained in the tundra of Arctic Urals were used).

## 2.3 Methods

All principal key sites where the experimental data were obtained for the emission inventory are shown in Fig. 1. In the subtaiga zone, the work was done in “Tarmany” (no. 22), “Muldashi” (no. 23), “Obskoe” (no. 8), “Tagan” (no. 27), and “Baturino” (no. 28) sites (Table 1). Measurements of emission were made by the static chambers method during summer–autumn periods of 2003–2009. The techniques of these and accompanying measurements are described in detail in (Glagolev et al, 2008).

The regional flux ( $F$ , TgC–CH<sub>4</sub>/year) in the model was calculated by the equation

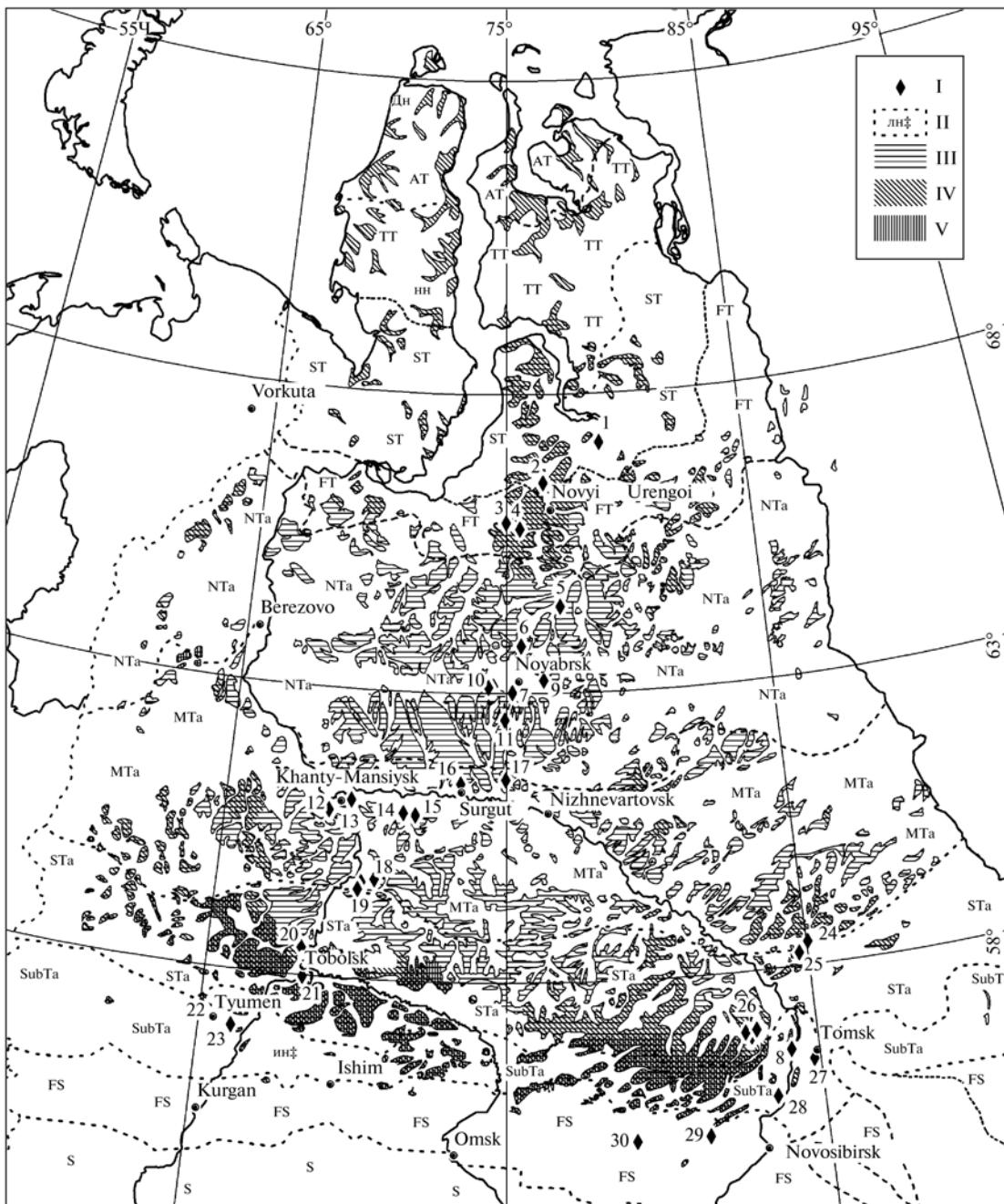
$$F = \beta \cdot \sum_{k=0}^l F_k; \quad F_k = \sum_{i=1}^n f_{ik} \cdot S_{ik} \cdot T_k; \quad f_{ik} = \sum_{j=1}^m (\varphi_{jk} \cdot \alpha_{ijk}),$$

where  $\beta$  is the coefficient of recalculation of milligrams into teragrams ( $\beta = 10^{-15}$ );  $F_k$  (mg C–CH<sub>4</sub>/year) is the flux of methane from  $k$ -th natural zone ( $k = 1, 2, \dots, l, l = 8$ :  $k = 1$  is the steppe,  $k = 2$  is the forest steppe,  $k = 3$  is subtaiga,  $k = 4$  is southern taiga,  $k = 5$  is middle taiga,  $k = 6$  is northern taiga,  $k = 7$  is the forest tundra,  $k = 8$  is the tundra);  $f_{ik}$  (mg C–CH<sub>4</sub> m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup>) is the specific flux of methane from mire complexes of the  $i$ -th type in the  $k$ -th natural zone ( $i = 2, \dots, n, n = 20$  according to typology suggested by E.A. Romanova as described in (Peregon et al, 2008));  $S_{ik}$  (m<sup>2</sup>) is the area of mire complexes of the  $i$ th type in the  $k$ th natural zone (the areas were calculated by means of the electronic map of Western Siberia swamp complexes (Peregon et al, 2008));  $T_k$  (h/year) is the period of emission of methane in the  $k$ -th natural zone (tundra—2424, forest tundra—2832, northern taiga—3240, middle taiga—3912, southern taiga—4056, subtaiga—4392, forest steppe—4704, steppe—5112; such choice is substantiated, e. g., in (Glagolev, 2008));

$\alpha_{ijk}$  is a part of the landscape of the  $j$ th kind ( $j = 1, 2, \dots, m, m = 8$ ;  $j = 1$ —floating mats,  $j = 2$ —frozen hillocks,  $j = 3$ —ridges,  $j = 4$ —oligotrophic hollows,  $j = 5$ —mesotrophic fens,  $j = 6$ —eutrophic fens,  $j = 7$ —intraswamp lakes,  $j = 8$ —ryams) on mires of the  $i$ th type in the  $k$ th natural zone (numerical values are taken from (Peregon et al, 2008));

$\varphi_{jk}$  is the specific flux of methane from a microlandscape of the  $j$ th kind in the  $k$ th natural zone (the values of  $\varphi_{jk}$  are obtained by statistical modeling in accordance with empiric distribution of probabilities using the method of reverse transformation (Harbaugh, 1970)).

The densities of probabilities were constructed by the method of “histograms with intervals of equal probability” with further spline approximation. Estimation of a potential scattering of the regional emission values was made by the Monte Carlo method.



**Fig. 1.** Measurements of methane emission for the emission inventory of the regional flux Bc5. I, Key sites: 1 Tazovskii, 2 Novyi Urengoi, 3 Pangody, 4 PangodyKhasyrei, 5 Purpe, 6 NoyabrskPalsa, 7 Noyabrsk GMOK, 8 Obskoe (O.), 9 NoyabrskDenna, 10 NoyabrskKholmy, 11 Ortyagun, 12 Mukhrino, 13 ShapshaChistoe, 14 Lempino, 15 Poikovskii, 16 Surgut, 17 Agan, 18 Vakh, 19 Damyanka, 20 Tobolsk, 21 Kachipovo, 22 Tramany (T.Tar.), 23 Muldashi (T.Tu.), 24 Panikov Mokh, 25 Belyi Yar, 26 Plotnikovo, 27 Tagan, 28 Batyrino (Bat.), 29 Kuznetskii Ryam, 30 Nikolaevka; II, Boundaries of botanical-geographic subzones: arctic tundra (AT), typical tundra (TT), southern tundra (ST), forest tundra (FT), north taiga (NTa), middle taiga (MTa), southern taiga (STa), subtaiga (SubTa), forest steppe (FS), steppe (S); III, prevalence of oligotrophic bogs

### 3. Results and discussion

According to the typological map of mires of the fens make up 57.7%, high bogs 28.1%, ridges 6.9%, Western Siberian plain by Romanova (Peregona et al, 2005), in the oligotrophic hollows 5.2%, mesotrophic fens 1.1%, subtaiga zone, ten types of mire complexes may be dis lakes and floating mats 0.5% of the total area of cerned. Generally, summing up the elements of subtaiga mires. g type; IV, prevalence of mesotrophic fen type; V, prevalence of eutrophic fen type. Major measurement results of methane emission in some typical microlandscapes are shown in Table 2. On the basis of these and previously made measurements (Glagolev and Lapshina, 2008), the distributions of densities of probabilities of specific

methane fluxes were constructed for oligotrophic hollows, mesotrophic and eutrophic fens (Fig. 2). Bimodality of distribution for oligotrophic hollows of ridge-hollow complexes (RHCs) may depend on different hydrological conditions of small pool and large pool RHCs (in the former, on average, the water level is lower and thus the conditions for the formation of CH<sub>4</sub> are not so favorable as in the latter; therefore, the left peak of distribution should correspond to pools of small pool RHCs and the right peak to large pool RHCs).

Unfortunately, since the information on methane emission in typical ecosystems of subtaiga is still inadequate, for the construction of densities of probabilities of CH<sub>4</sub> fluxes in other micro-landscapes we have to use some additional simplifying assumptions in the emission inventory. The measurement results of emission in ridges of subtaiga are combined with those for southern taiga (the same is done for intraswamp lakes), for high bogs and floating mats the characteristic fluxes are assumed to be equal to the corresponding fluxes in southern taiga. On the basis of the aforementioned distributions and the structure of swamp complexes the emission inventory Bc5 gives the value of annual emission for this zone to be  $0.8 \pm 0.6$  MtC-CH<sub>4</sub> ( $5.2 \pm 3.0$  MtC-CH<sub>4</sub> for all Western Siberia). It may seem that the emission inventory gives only the recent geographic section of the emission of methane and gives no possibility to compose its prognosis under the conditions of changing climate. Actually, this is not a basic but a rather technical limitation which may be omitted at present. There are studies both on prognostication of local ecosystem transformations and on modeling of displacement of natural zones at a possible climatic change. Thus, prediction of CH<sub>4</sub> emission on the basis of the emission inventory would become possible at its combination with the corresponding bioclimatic models. For the use of the emission inventory in combination with modern bioclimatic models it is necessary to envisage a possibility of description of the seasonal distribution of CH<sub>4</sub> emission (as often the time step in models is assumed to be less than one year, e. g., one month). Therefore, in Bc5 the linear relationship between emission and temperature of the previous month is assumed (if it is positive, failing that, the emission is assumed to be zero). Generally, the direct proportionality of the CH<sub>4</sub> flux to temperature has repeatedly been found previously (Christensen, 1993). The suggested monthly lag in this relationship may have a physical sense. Indeed, the bulk of microbes methanogenes is situated not in the surface (aerobic) soil layer but in a deeper anaerobic layer. Thus, the study (Glagolev, 1998) demonstrated that in Bakcharskoe mire (a part of Great Vasyugan mire) the maximum of actual methanogenic activity is attained at the depth of 20–30 m and then slowly decreases. From soil physics, it is known that, at harmonic (with the amplitude  $A$  and the radial frequency  $w$ ) change of temperature ( $T$ ) with time ( $t$ ) on the soil surface  $T(t) = T + A\sin(wt)$ , at the depth  $z$  the temperature would change according to the law  $T(z, t) = T_{av} + A\exp(-z/d)\sin(wt - z/d)$ , where  $T_{av}$  is the mean temperature;  $d = [2L/C_v w]^{0.5}$ ; and  $L$  and  $C$  are the coefficient of thermal conductivity and heat capacity per unit volume of soil, respectively. Thus, it is evident that the temperature wave reaches the depth of the methanogenic layer after a considerable time (thus explaining the necessity to take lagging into consideration) and short periodic fluctuations of temperature on the surface are not reflected the temperature in this layer (thus explaining the necessity of monthly averaging). Thus, while work with laboratory samples reveal a clear relationship between the current methane emission and the current temperature values, under natural conditions a relationship between the average values of temperature and lagging in time should take place. It should be noted that at the assumed “relationship with monthly lagging” the experimental data may be sufficiently well described, including a phenomenon of temperature hysteresis of emission described in (Glagolev, 2002). The gridded data are presented in the dbf file compatible with GIS software (Arcview and Mapinfo). The file is created using the method described above and gridded map data by Peregón et al (2008).

## References

- Bousquet P., P. Ciais, J. B. Miller, E. J. Dlugokencky et al (2006) Contribution of anthropogenic and natural sources to atmospheric methane variability, *Nature* 443, 439-443 ,doi:10.1038/nature05132
- Christensen, T.R.(1993), Methane Emissions from Arctic Tundra, *Biochem.*, 21, 117–139.
- Glagolev, M.V., (1998) Modeling of Production, Oxidation and Transportation Processes of Methane, in *Global Environ. Res. Fund: EcoFrontier Fellowship (EFF) in 1997*, Tokyo: Environmental Agency. Global Environmental Department. Research & Information Office, 79–111.
- Glagolev, M.V., (2002) Temperature Hysteresis of Methane Flux from the Soil, in “*Biologiya—nauka XXI veka:*” *6ya Pushchinskaya shkolakonf. molodykh uchenykh (Pushchino, 20–24 maya 2002 g.): Sb. tezisov* (Proc. 6th Pushchino SchoolConf. of Young Scientists “Biology is the Science of XXI Century”), Tula: Izdvo gos. ped. unta im. L.N. Tolstogo, , 3, 97–98.
- Glagolev, M.V. (2008) Methane Emission: Ideology and Methodology of the emission inventory for Western Siberia, in *Sb. nauch. tr. kaf. YuNESKO Yugorskogo gosunta* (Collection of Scientific Works of UNESCO Chair of Yugra State University), Novosibirsk: NGU, 1, 176–190.
- Glagolev, M.V. and S. Maksyutov (2009) Emission inventory (Ab4) for CH<sub>4</sub> Emission by Western Siberia Swamps, in *Matematicheskoe modelirovanie v ekologii: Mat. Nats. konf. s mezhdunar. uchastiem (1–5 iyunya 2009 g.)* (Proc. National Conf. with International Participation (June 1–5, 2009)), Pushchino: IFKHiBPP RAN, 78–79.
- Glagolev, M.V. and Lapshina, E.D., (2008) in *Sb. nauch. tr. kaf. YuNESKO Yugorskogo gosunta* (Collection of Scientific

- Works of UNESCO Chair of Yugra State University), Novosibirsk: NGU, 1, 55–83.
- Gvozdetskii, N.A., Krivolutskii, A.E., and Makunina, A.A., (1973) Scheme of PhysicoGeographical Zoning for the Tyumen Region, in *Fizikogeograficheskogo raionirovanie Tyumenskoi oblasti* (PhysicoGeographical Zoning for the Tyumen Region), Moscow: MGU, 9–28.
- Harbaugh, J.W. and BonhamCarter, G., (1970) *Computer Simulation in Geology*, New York: Wiley Interscience,
- Kazantsev, V.S. and Glagolev, M.V. (2008) CH<sub>4</sub> Emission in North Taiga Subzone: Aa3 emission inventory, in *Dinamika okruzhayushchei sredy i global'nye izmeneniya klimata. Sb. nauch. tr. kaf. YuNESKO Yugor skogo gos. unta* (Environmental Dynamics and Climate Global Changes: Collection of Scientific Works of UNESCO Chair of Yugra State University), Glagolev, M.V. and Lapshina, E.D., Eds., Novosibirsk: NGU, 1, 200–207.
- Karol', I.L., (1996) Estimations of Greenhouse Gases Relative Contribution into Climate's Global Warming, *Metrolog. Hidrolog.*, 11, 5–6.
- Krupchatnikov, V.N. and Krylova, A.I., (2004) Simulation of Methane Emission by Natural Overmoistened Soils and Surface Hydrology in Consideration of Topography, *Geolog. Prirodn. Resursy*, Special issue, 272– 276.
- Liss, O.L., Abramova, L.I., Avetov, N.A., et al., (2001) *Bolotnye sistemy Zapadnoi Sibiri i ikh prirodookhrannoe znachenie* (Swamp Systems of Western Siberia and Their Importance for Nature Conservation), Tula: Grif&K.
- Peregon, A., Maksyutov, S., Kosykh, N., et al., (2005) Application of MultiScale Remote Sensing and GIS to Mapping Net Primary Production in West Siberian Wetlands, *Phyton*, 45, special issue APGC 2004.
- Peregon, A., Maksyutov, S., Kosykh, N., et al., (2008) Map Based Inventory of Wetland Biomass and Net Primary Production in Western Siberia, *J. Geophys. Res.*, 113, G011007.
- Rikhter, G.D., (1963) *Zapadnaya Sibir'* (Western Siberia), Moscow: Izd-vo AN USSR.

**Table 1.** General characteristic of the investigation

Key site	Points of measurement	Coordinates	General characteristic
“Tagan”	Ta1	56.4° N, 84.8° E	Peat deposit near Tomsk city situated in the valley of the Chernaya River, a left bank tributary of the Tom. In this territory <i>eutrophic</i> pine and pine-birch forest prevail. In the herb storey the dominants are: <i>Calamagrostis</i> sp., <i>Comarum palustre</i> , <i>Menyanthes trifoliata</i> , <i>Athyrium foix-femina</i> , <i>Dryopteris cartusiana</i> , <i>Thelypteris palustris</i> , <i>Carex</i> sp., and green mosses ( <i>Pleurozium schreberi</i> , <i>Aulacomnium palustre</i> , <i>Plagiomnium ellipticum</i> , <i>Tomentypnum nitens</i> , and <i>Helodium blandowii</i> ).
“Obskoe”	O1, O3, O5.1, O5.2, O5.3.1, O5.3.2, O5.4.1, O5.4.2, O5.5.1, O5.5.2	56.6° N, 84.1° E*	The key site is a terrace swampy tract of complex structure extending along the left bank of the Ob. Closer to the second above-floodplain terrace in places of termination of rich carbonate waters the dominant situations are: open sedge-Hypnum mires ( <i>Carex diandra</i> , <i>C. chordorrhiza</i> , <i>Drepanocladus aduncus</i> , <i>D. sendneri</i> , <i>Bryum pseudotriquetrum</i> ) [18]. Near the floodplain they are changed into the oriented heterotrophic string-flark complexes with birch ( <i>Betula pubescens</i> ) and fern ( <i>Telypteris palustris</i> ) on strings and sedge-Hypnum mires. Along the floodplain there is a stretch of birch- <i>Calamagrostis purpurea</i> and birch-spruce ( <i>Picea obovata</i> ). Measurements were made near Melnikovo settlement on a stretch of eutrophic birch- <i>Calamagrostis sogra</i> ( <i>sogra</i> —minerotrophic wooded herb-moss swamp).
“Tarmany”	T.Tar.Fen.1.1, T.Tar.Fen.1.2, T.Tar.Fen.2.1, T.Tar.Fen.2.2	57.4° N, 65.4° E	Tarman lake-swamp tract situated 25 km northwest of Tyumen on the left bank terrace of the Tura River. The swamp complex is formed due to paludification of a large lake, as indicated by its round form and presence of sapropel. At present, the vegetation is represented by <i>eutrophic</i> willow ( <i>Salix cinerea</i> ) and willow-sedge ( <i>Carex diandra</i> ) quaking mats. In the central part, the structure of this tract is complicated by birch strings.
“Baturino”	Bat1, Bat2.d, Bat2.u, Bat3.d, Bat3.u	55.8° N, 83.5° E	Swamp tract on the territory of Tomsk region with prevalence of eutrophic swamps. For the description and further references see [11]. Still, measurements are made on a small <i>oligotrophic</i> site near the lake.
“Muldashy”	T.Tu.L.-1, T.Tu.L.-2, T.Tu.L.-3, T.Tu.Ca.-1, T.Tu.Er.-1	57° N, 66° E	The key site is situated 30 km southeast of Tyumen and is part of the left bank of the Pyshma River, itself a left bank tributary of the Tura. The territory is characterized by high paludification and prevailing eutrophic swamp tracts with birch ( <i>Betula pubescens</i> ) in the arboreal storey. Small areas are occupied by <i>mesotrophic</i> sedge-Sphagnum ( <i>Carex lasiocarpa</i> ) and cotton sedge-Sphagnum ( <i>Eriophorum vaginatum</i> ) swamps where the measurements were made. In addition, investigations of water courses were also made on overgrowing oxbow lakes of the Duvan River.

Table 2. Methane emission

pint	location		date	temp				swl	vegetation <sup>1)</sup>	<i>emission CH<sub>4</sub></i> ( <i>mgC·m<sup>-2</sup>·hour<sup>-1</sup></i> )		
	latitude	longitude		air	Soil depth h (cm)					mean	STD	
					0	5	15					45
<i>Mesotrophic wetlands</i>												
T.Tu.Ca.-1	57.02202	66.05367	08.08.07	17.3	18.1	18.4	16.5	13.9	0	<i>Cars, Com</i>	17.16	12.55
T.Tu.Ca.-1	57.02202	66.05367	08.08.07	17.3	18.1	18.4	16.5	13.9	0	<i>Cars, Com</i>	5.68	0.11
T.Tu.Er.-1	57.08693	65.98662	08.08.07	13.4	14.4	16.6	16.3	13.1	8	<i>Eri</i>	1.45	0.14
T.Tu.Er.-1	57.08693	65.98662	08.08.07	13.4	14.4	16.6	16.3	13.1	7.5	<i>Eri</i>	0.18	0.52
<i>Eutrophic wetlands</i>												
O1	56.5515	84.0873	03.08.03	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	<i>Bet, Phr, Cars</i>	16.65	2.39
O1			03.08.03	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	<i>Bet, Phr, Cars</i>	19.57	0.77
O1			23.07.04	n.d	18.0	17.2	17.0	16.5	n.d	<i>Bet, Phr, Cars</i>	15.75	1.75
O1			01.08.05	25.4	20.3	19.8	19.8	18.6	n.d	<i>Bet, Phr, Cars</i>	14.01	1.19
O1			10.08.05	16.4	15.8	16.0	16.8	17.9	n.d	<i>Bet, Phr, Cars</i>	5.79	1.19
O3	56.5516	84.1087	03.08.03	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	<i>Bet, Phr, Cars</i>	13.1	0.76
O3			03.08.03	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	<i>Bet, Phr, Cars</i>	16.3	1.04
O3			01.08.05	26.3	20.6	19.8	19.7	18.4	n.d	<i>Bet, Phr, Cars</i>	18.59	1.46
O3			10.08.05	16.4	15.8	16.0	16.8	17.9	n.d	<i>Bet, Phr, Cars</i>	16.16	0.48
O5.1	500 m from O1 and O3		14.07.07	n.d	18.9	18.2	17.1	14.5	n.d	<i>Bet, Cal, Cars</i>	19.58	1.63
O5.2			14.07.07	n.d	18.9	18.2	17.1	14.5	n.d	<i>Bet, Cal, Cars</i>	20.72	2.21
O5.3.1			14.07.07	n.d	21.0	19.0	17.0	14.4	n.d	<i>Bet, Cal, Cars</i>	16.57	1.38
O5.3.2			14.07.07	n.d	22.0	19.4	17.0	14.4	n.d	<i>Bet, Cal, Cars</i>	9.25	0.77
O5.4.1			14.07.07	n.d	22.0	19.4	17.0	14.4	n.d	<i>Bet, Cal, Cars</i>	8.82	1.50
O5.4.2			14.07.07	n.d	22.7	20.2	17.0	14.4	n.d	<i>Bet, Cal, Cars</i>	6.44	1.53
O5.5.1			14.07.07	n.d	21.4	20.5	17.4	14.4	n.d	<i>Bet, Cal, Cars</i>	18.10	1.51
O5.5.2			14.07.07	n.d	21.4	20.5	17.6	14.4	n.d	<i>Bet, Cal, Cars</i>	22.84	3.46
T.Tar.Fen.1.1	57.38442	65.43055	07.09.08	16.3	11.5	10.7	10.4	10.8	-3	<i>Sal, Cap, Cac</i>	3.59	0.47
T.Tar.Fen.1.1			07.09.08	16.3	11.5	10.7	10.4	10.8	-3	<i>Sal, Cap, Cac</i>	3.44	0.49
T.Tar.Fen.1.1			07.09.08	16.3	11.5	10.7	10.4	10.8	-4	<i>Sal, Cap, Cac</i>	1.26	0.04
T.Tar.Fen.1.2			07.09.08	15.5	11.5	11.1	10.2	10.7	-3	<i>Sal, Cap, Cac</i>	1.78	0.06
T.Tar.Fen.1.2			07.09.08	15.5	11.5	11.1	10.2	10.7	-5	<i>Sal, Cap, Cac</i>	2.26	0.17
T.Tar.Fen.1.2			07.09.08	15.5	11.5	11.1	10.2	10.7	-6	<i>Sal, Cap, Cac</i>	2.52	0.13
T.Tar.Fen.2.1	57.37238	65.40948	08.09.08	15.7	13.9	12.8	10.9	10.6	8	<i>Sal, Car, Com</i>	1.15	0.07
T.Tar.Fen.2.1			08.09.08	15.7	13.9	12.8	10.9	10.6	6	<i>Sal, Car, Com</i>	1.21	0.05
T.Tar.Fen.2.1			08.09.08	15.7	13.9	12.8	10.9	10.6	5	<i>Sal, Car, Com</i>	1.62	0.09
T.Tar.Fen.2.2			08.09.08	18.2	15.7	14.0	10.9	10.5	7	<i>Sal, Car, Com</i>	3.46	0.14
T.Tar.Fen.2.2			08.09.08	18.2	15.7	14.0	10.9	10.5	5	<i>Sal, Car, Com</i>	2.47	0.12
T.Tar.Fen.2.2			08.09.08	18.2	15.7	14.0	10.9	10.5	6	<i>Sal, Car, Com</i>	1.30	0.08
Ta1	56.35312	84.79995	30.06.09	19.8	16.2	13.3	11.9	10.0	3	<i>Bet, Cal, Ath</i>	2.34	0.09
Ta1			30.06.09	19.8	16.2	13.3	11.9	10.0	5	<i>Bet, Cal, Ath</i>	0.00	0.01
Ta1			30.06.09	19.8	16.2	13.3	11.9	10.0	3	<i>Bet, Cal, Ath</i>	0.53	0.03
Ta1			30.06.09	19.8	16.2	13.3	11.9	10.0	5	<i>Bet, Cal, Ath</i>	0.79	0.09
Ta1			30.06.09	17.0	15.6	13.4	11.8	10.0	4	<i>Bet, Cal, Ath</i>	0.08	0.05
Ta1			30.06.09	17.0	15.6	13.4	11.8	10.0	5	<i>Bet, Cal, Ath</i>	0.56	0.04
Ta1			30.06.09	17.0	15.6	13.4	11.8	10.0	5	<i>Bet, Cal, Ath</i>	0.39	0.05
Ta1			30.06.09	17.0	15.6	13.4	11.8	10.0	4	<i>Bet, Cal, Ath</i>	0.05	0.06
Ta1			30.06.09	14.9	14.9	13.4	11.8	10.0	5	<i>Bet, Cal, Ath</i>	0.03	0.05
Ta1			30.06.09	14.9	14.9	13.4	11.8	10.0	4	<i>Bet, Cal, Ath</i>	1.33	0.33
Ta1			30.06.09	14.9	14.9	13.4	11.8	10.0	0	<i>Bet, Cal, Ath</i>	-0.01	0.01
Ta1			30.06.09	14.9	14.9	13.4	11.8	10.0	3	<i>Bet, Cal, Ath</i>	0.81	0.06
Ta1			30.06.09	14.5	14.6	13.4	11.9	10.0	6	<i>Bet, Cal, Ath</i>	0.45	0.62
Ta1			30.06.09	14.5	14.6	13.4	11.9	10.0	3	<i>Bet, Cal, Ath</i>	2.10	0.08
Ta1			30.06.09	14.5	14.6	13.4	11.9	10.0	6	<i>Bet, Cal, Ath</i>	0.02	0.07
Ta1			30.06.09	14.5	14.6	13.4	11.9	10.0	2	<i>Bet, Cal, Ath</i>	1.81	0.14
Ta1			30.06.09	14.4	14.3	13.3	11.9	10.0	3	<i>Bet, Cal, Ath</i>	0.24	0.17



Ta1			30.06.09	14.4	14.3	13.3	11.9	10.0	11	<i>Bet, Cal, Ath</i>	1.21	0.26
Ta1			30.06.09	14.4	14.3	13.3	11.9	10.0	11	<i>Bet, Cal, Ath</i>	4.86	1.94
Ta1			30.06.09	14.4	14.3	13.3	11.9	10.0	6	<i>Bet, Cal, Ath</i>	0.51	0.23
<i>In-wetland lakes</i>												
T.Tu.L.-1 <sup>2)</sup>	57.00623	66.07278	08.08.07	17.5	19.8	19.9	18.7	16.2	-35	-	212.34	43.23
T.Tu.L.-2 <sup>2)</sup>	57.00627	66.07262	08.08.07	17.5	19.8	19.9	18.7	16.2	-25		39.30	1.59
T.Tu.L.-3 <sup>2)</sup>	57.00632	66.07233	08.08.07	18.5	19.5	18.6	17.7	15.3	-20		84.64	3.59

<sup>1)</sup> *Athyrium filix-femina* - *Ath*, *Betula pubescens* - *Bet*, *Calamagrostis* sp. – *Cal*, *Calla palustris* - *Cap*, *Calliergon cardifolium* - *Cac*, *Carex rostrata* - *Car*, *Carex* sp. - *Cars*, *Comarum palustris* - *Com*, *Eriophorum* sp. – *Eri*, *Phragmites australis* – *Phr*, *Salix cinerea* – *Sal*.

# Estimation of West Siberian methane flux: Evaluation of methane emissions from West Siberian wetlands

Heon-Sook Kim<sup>1</sup>, Shamil Maksyutov<sup>2</sup> and Gen Inoue<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Research Institute for Humanity and Nature

<sup>2</sup>National Institute for Environmental Studies

## 1 Introduction

Atmospheric methane (CH<sub>4</sub>), a potent greenhouse gas following carbon dioxide, has been increasing again after the steady state of its growth rate with near zero during 2000-2006 and its large increase was observed globally in 2007, especially at polar northern latitudes. The causes of the 2007 increase are still uncertain, but wetland CH<sub>4</sub> emissions enhanced by very high temperatures in the northern regions and greater than average precipitation in the tropics is being designated as one of potential contributors (Dlugokencky et al. 2009, Bloom et al. 2010). The CH<sub>4</sub> emissions from wetlands is the largest single source of CH<sub>4</sub> (92-237 Tg/year; IPCC 2001) and plays an important role in the year-to-year variation of global CH<sub>4</sub> budget (Bousquet et al. 2006). The CH<sub>4</sub> production from anaerobic bacterial decomposition in wetlands depends highly on soil temperature and water table (Walter et al. 2001a) and the climate-induced changes of the wetland emissions have been investigated (e.g. Walter et al. 2001b, Shindell et al. 2004). The CH<sub>4</sub> emissions from wetlands have been estimated, but their global distribution and magnitudes are still largely uncertain.

Matthews and Fung (1987) published a global 1° resolution database of simplified five major wetland types, compiling the three independent data on vegetation, soil properties and fractional inundation. The total CH<sub>4</sub> emissions from the derived global wetlands of  $\sim 5.3 \times 10^{12}$  m<sup>2</sup> was estimated to be  $\sim 110$  Tg/yr using the typical emission rates for the five wetland types based on the limited field measurements and a simple assumption about the period of the CH<sub>4</sub> production season with latitudinal bands. Another global distribution of wetlands with a 2.5° latitude by 5° longitude grid was published by Aselmann and Crutzen (1989), compiling the published information and various map for simplified six wetland types. From the derived global wetland area of  $\sim 5.7 \times 10^{12}$  m<sup>2</sup>, the global CH<sub>4</sub> emissions of 40-160 Tg/yr was estimated using geometric mean of the measured emission rates for each wetland type and the emission periods determined by temperatures or inundation. In Aselmann and Crutzen (1989), about three times smaller emissions was estimated for latitudes 50°N-70°N as compared with Matthews and Fung (1987), but larger emissions for the southern tropics. These previous studies show that the global wetland distribution due to different classification of wetland types and the spatio-temporal extrapolation of emission rates from the limited field measurements for typical wetland types are one of contributors to large uncertainties in wetland emission estimates.

The largest wetland area lies in West Siberia, which is equivalent to 27% ( $6.85 \times 10^{11}$  m<sup>2</sup>) of the area of West Siberia (Peregon et al., 2008). The extensive West Siberian wetlands with 40% of the global deposits (Walter, 1977) mainly determines the seasonal cycle of West Siberian CH<sub>4</sub> and plays an important role in global carbon cycle as a large carbon sink and a major natural source of atmospheric CH<sub>4</sub> (Smith et al. 2004). The large amounts of soil carbon deposited in permafrost may be released under warm climate. Anisimov (2007) reported that the annual net CH<sub>4</sub> flux from Russian permafrost regions may increase by 6-8 Tg/yr in 2050 depending on GFDL future climatic scenario, of which 2.2-3.3 Tg/yr come from West Siberia. It has been recognized the significance of West Siberian wetlands on the global cycle, but the understanding of the CH<sub>4</sub> emission magnitude from West Siberian wetlands and its spatio-temporal distribution is not enough. Recently, Glagolev et al. (2010) published the CH<sub>4</sub> emission data from West Siberian wetlands at 0.5° resolution, using in situ measurements for each bioclimatic zone and a detailed wetland classification. In their updated version, the estimated CH<sub>4</sub> emission from West Siberian wetlands of 3.3 Tg/yr is small with its different north-south gradient as compared with the estimates in Fung et al. (1991) which are improved in bog emissions than Matthews and Fung (1987).

In this study, we estimate West Siberian CH<sub>4</sub> flux through inverse modeling with the updated CH<sub>4</sub> emission from West Siberian wetlands and understand the seasonal cycle of West Siberian CH<sub>4</sub> flux. Inverse modeling called a top-bottom approach has been introduced as a tool for evaluating and refining emission estimates using atmospheric CH<sub>4</sub> measurements. Two airborne measurements of CH<sub>4</sub> over West Siberia are used in this inverse modeling. To evaluate the updated wetland emission of Glagolev et al. (2010), the inversions are performed with different wetland emissions.

## 2 Inverse modeling of CH<sub>4</sub> with the updated emissions from West Siberian wetlands

### 2.1 Inverse modeling

We use a time-dependent Bayesian inversion applied in Transcom 3 experiment which assesses the influence of different transport algorithms on CO<sub>2</sub> inversion (Gurney et al, 2004). The Bayesian inversion minimizes the difference between modeled concentrations GF (G represents green function) and observed concentrations x and between predicted flux magnitudes F and their prior flux magnitudes F<sub>0</sub> using singular value decomposition (SVD). A cost function J is defined as

$$J = \frac{1}{2} [(GF - x)^T C_x^{-1} (GF - x) + (F - F_0)^T C_{F_0}^{-1} (F - F_0)] \quad (1)$$

where  $C_x$  and  $C_{F_0}$  are covariance matrixes for observations and prior flux estimates, respectively. In this study, we invert a seasonal cycle for monthly observations to optimize monthly flux magnitudes per 12 land regions per two flux categories for a single year. The individual CH<sub>4</sub> surface sources are classified into two flux categories: anthropogenic sources from fossil fuel, waste treatment and ruminant animals and natural sources from biomass burning, wetlands, rice paddies, termites, and soils.

In forward simulations, the individual monthly CH<sub>4</sub> surface sources for each region are emitted for a single month then discontinued for the remainder of the 6-year simulation to consider the response of atmospheric CH<sub>4</sub>, using interannually repeating OH and winds for the analysis year. The NIES transport model (Maksyutov and Inoue, 2000) simulates a total of 288 tracers for CH<sub>4</sub>, representing a combination of 12 land regions (Fig.1) and 12 months for two source categories. The off-line model has 2.5° × 2.5° horizontal resolution and 15 vertical layers up to 20km in altitude and is forced by the 12 hourly National Centers for Environmental Prediction/National Center for Atmospheric Research (NCEP/NCAR) reanalysis data (Kalnay et al., 1996) with semi-lagrangian transport algorithm. Chemical destruction of CH<sub>4</sub> by OH which is the main CH<sub>4</sub> sink is included in forward simulations, not considering stratospheric sink. We use monthly OH fields predicted by CHASER (Chemical AGCM for Study of Atmospheric Environment and Radiative forcing) (Sudo et al., 2002) which is developed to simulate the tropospheric photochemistry involving the O<sub>3</sub>-HO<sub>x</sub>-CH<sub>4</sub>-CO photochemical system and oxidation of non-methane hydrocarbons, based on an atmospheric general circulation model (AGCM). The mean lifetime of the tropospheric CH<sub>4</sub> predicted in forward simulations is 9.7 years which is very close to the recommended value of 9.6 years in IPCC 3<sup>rd</sup> report (2001). We use temporal and spatial distributions from the Emission Database for Global Atmospheric Research (EDGAR) inventory (Oliver and Berdowski, 2001) for anthropogenic flux and Goddard Institute for Space Studies (GISS) inventory (Fung et al., 1991) for natural fluxes with individual flux magnitudes presented in Patra et al. (2009).

We invert monthly mean observations in 2002-2007 at 59 sites taken from GLOBALVIEW-CH<sub>4</sub> which is a product of the Cooperative Atmospheric Data Integration Project collecting weekly atmospheric observations by NOAA's Earth System Research Laboratory (NOAA/ESRL): 52 surface-level sites and 7 vertical profiles (Fig. 1) which are chosen where the data records are at least 70% complete in 2002-2007. Two vertical profiles of airborne measurements over West Siberia are added as observation constraints on flux estimates, which are performed at eight levels (500, 1000, 1500, 2000, 3000, 4000, 5500,

7000 m) once a month at Surgut and Novosibirsk under good weather. The monthly mean in 1993-2007 at Surgut and 1997-2007 at Novosibirsk are used respectively. The discrete-level concentrations of the vertical profile are converted to a partial-column concentration up to 4000 m, assuming that each level concentration represents a column concentration having 1000 m thickness centered at each level. The uncertainties of surface-level data are taken from the residual standard deviation (RSD) of GLOBALVIEW-CH<sub>4</sub>, but for partial-column data the weighted mean of RSD for each level are used as data uncertainties. A minimum of the data uncertainty is set to 6 ppb to avoid strong effect of one site. Prior flux estimates are identical to the flux magnitudes used in forward simulations and the prior flux uncertainties are 30% for anthropogenic sources and 50% for natural sources, but 30% for natural winter sources.

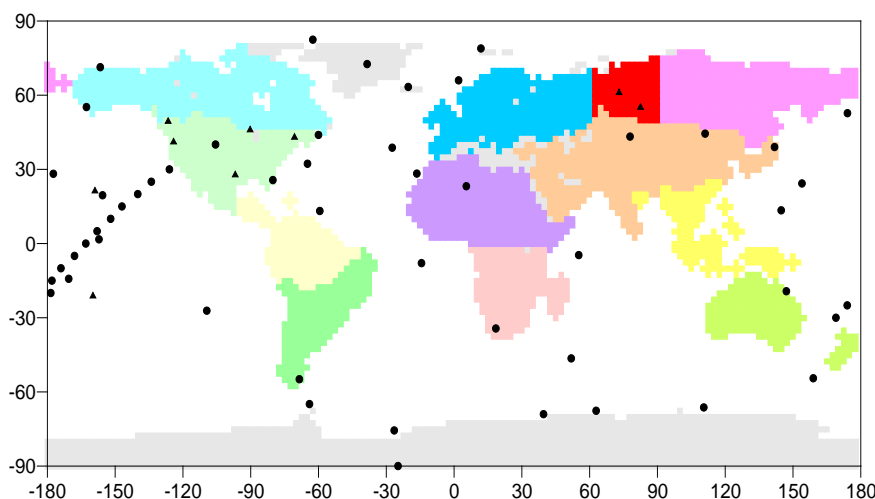


Figure 1. Map of 12 land regions and location of observation sites taken from GLOBALVIEW in this study. Black circles and triangles, 61 observation sites of atmospheric CH<sub>4</sub> at surface and vertical profiles, respectively. Two sites of Surgut and Novosibirsk are located in West Siberia (red area).

## 2.2 Updated CH<sub>4</sub> emissions from West Siberian wetlands

Glagolev et al. (2010) calculated the CH<sub>4</sub> emission data from West Siberian wetlands at 0.5° resolution using a statistical emission model based on in situ measurements for eight bioclimatic zones covering the whole West Siberia and twenty wetland types of Peregon et al. (2008). Measurements of CH<sub>4</sub> flux from West Siberian wetlands were performed by a static chamber method at 30 sites during summer-autumn of 2003-2009 and their location is shown in Fig. 2 with the spatial distribution of bioclimatic zones and major wetland types.

The CH<sub>4</sub> emission from West Siberian wetlands is estimated to be 3.3 Tg/yr in the updated version (Bc7), with strong CH<sub>4</sub> fluxes in the south of 60°N (Fig. 3, Left). The wetland area in southern taiga and subtaiga zones where major wetland type of eutrophic and mesotrophic fens is same with that for northern taiga zone where major wetland type of oligotrophic bogs. But larger CH<sub>4</sub> emissions were estimated in southern West Siberia due to stronger CH<sub>4</sub> fluxes from eutrophic and mesotrophic fens and this north-south gradient of wetland emissions is not shown in GISS inventory published in Fung et al. (1991) (Fig. 3, Right). In GISS inventory of wetland CH<sub>4</sub> emissions, the CH<sub>4</sub> emissions from West Siberian wetlands were estimated using both emission seasons and emission rates for forested and nonforested bogs based on the climatology of monthly surface air temperature and precipitation with a few CH<sub>4</sub> flux measurements based on the global wetland distribution of Matthews and Fung (1987) and the total wetland CH<sub>4</sub> emissions of West Siberia of 5.3 Tg/yr was estimated. As compared with the updated version (Bc7) of Glagolev et al. (2010), larger CH<sub>4</sub> emissions are shown in wetlands of northern taiga zones in GISS inventory and it may be derived by larger wetland area of northern taiga zone due to the simplified wetland types in Matthews and Fung (1987).

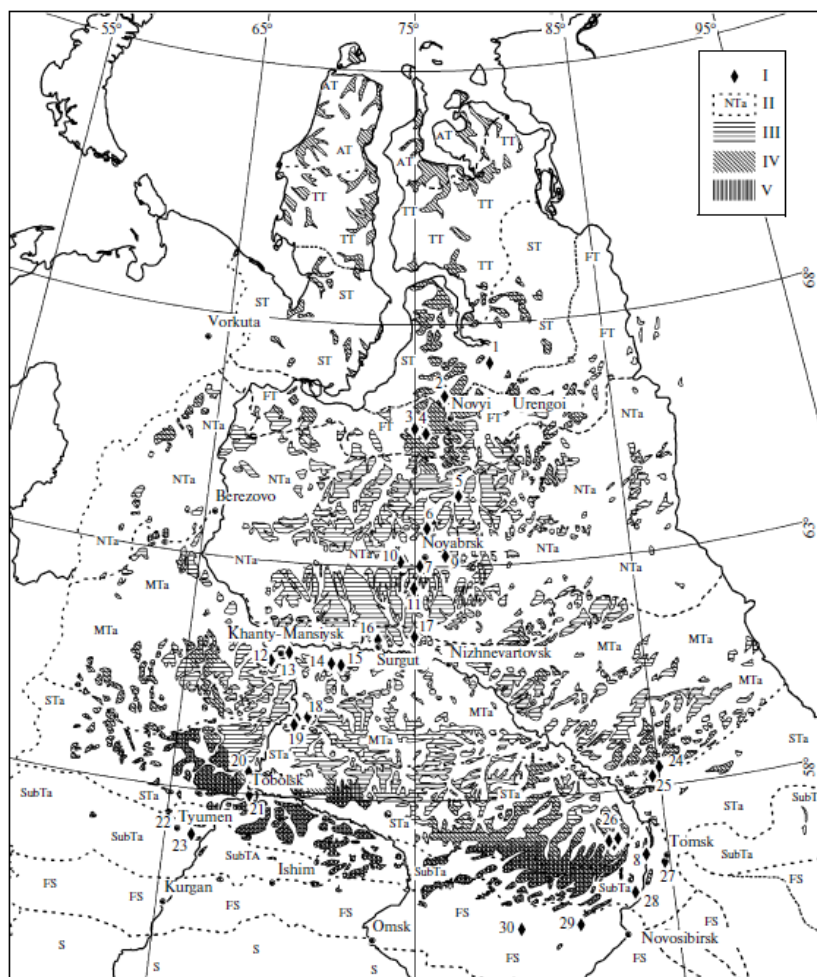


Figure 2. Location of CH<sub>4</sub> flux measurements with bioclimatic zones (taken from Glagolev et al. (2010)). I, 30 measurement sites; II, bioclimatic zones of arctic tundra (AT), typical tundra (TT), southern tundra (ST), forest tundra (FT), northern taiga (NTa), middle taiga (MTa), southern taiga (STa), subtaiga (SubTa), forest steppe (FS), steppe (S); III, prevalence of oligotrophic bog type; IV, prevalence of mesotrophic fen type; V, prevalence of eutrophic fen type.

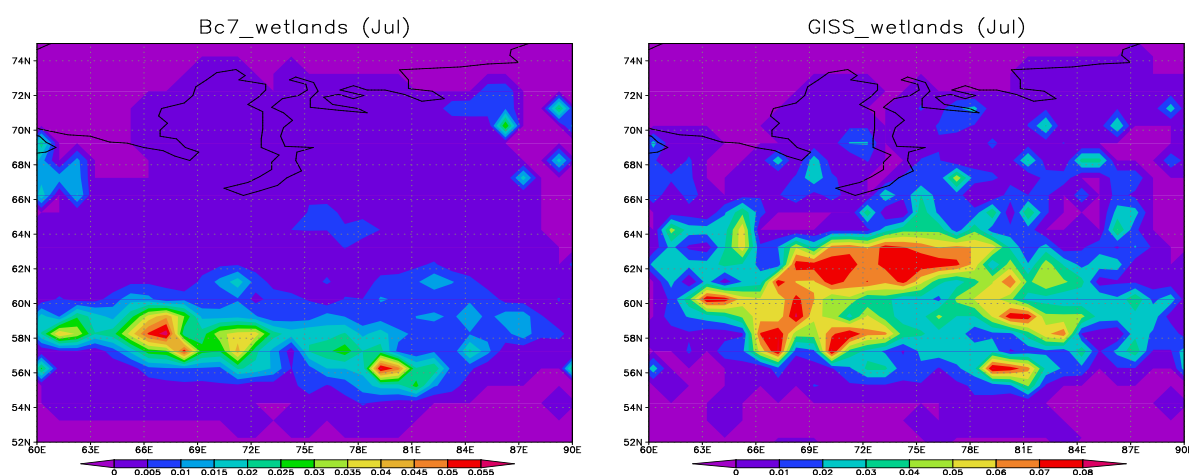


Figure 3. Spatial distributions of wetland CH<sub>4</sub> emissions (g/m<sup>2</sup>/day) for July in Bc7 and GISS inventories.

### 3 Results

To evaluate the updated version of West Siberian wetland CH<sub>4</sub> emissions, we estimated West Siberian CH<sub>4</sub> flux with different two West Siberian wetland emissions. EDGAR and GISS inventories of CH<sub>4</sub> emissions are used as the prior flux in one inversion (INV\_GISS). Another inversion (INV\_Bc7) uses the same prior flux with INV\_GISS, but the updated emissions for West Siberian wetland emissions. West Siberian CH<sub>4</sub> flux from anthropogenic and natural sources is estimated with different data uncertainties of two sites, Surgut and Novosibirsk in West Siberia. Although the two inversions use different prior fluxes in West Siberia, they estimate similar seasonal variations of West Siberian CH<sub>4</sub> fluxes with a peak in Jun-Aug by observational constraints. The similar annual and seasonal fluxes estimated in two inversions suggest that this inverse modeling is a robust method on flux estimates.

The annual mean CH<sub>4</sub> flux of West Siberia is estimated to be  $7.3 \pm 1.5$  Tg/yr in INV\_Bc7, which is 81% of the prior flux. The INV\_GISS estimates the annual mean flux of  $8.4 \pm 2.3$  Tg/yr, which is only 55% of the prior flux. Figure 4 shows the estimated seasonal fluxes, prior fluxes, and uncertainties of West Siberia in INV\_Bc7 and INV\_GISS and the uncertainty reduction of the prior flux is shown in 12 months for both two inversions. Great reduction in flux uncertainties is shown in INV\_GISS during May-Sep when wetland emission season by constraints of measurement data near wetlands and the May-Sep inversed flux is decreased to 50% of the prior flux. The inversed flux of INV\_Bc7 close to the prior flux and the inversed flux of INV\_GISS fallen off to about a half of the prior flux suggest that Bc7 inventory represents more reasonable seasonal variation of wetland CH<sub>4</sub> emissions in West Siberia. At Surgut (61.0°N, 73.0°E) where more abundant wetland emissions, the predicted summer CH<sub>4</sub> concentrations in INV\_Bc7 are close to observations, while higher CH<sub>4</sub> concentrations are predicted in INV\_GISS. Both two inversions predict the summer CH<sub>4</sub> concentrations close to observations at Novosibirsk (55.0°N, 82.5°E) where near wetlands. These results suggest that larger CH<sub>4</sub> emissions are emitted from the southern West Siberia than in the north of 60°N, indicating that the overestimated wetland emissions of northern taiga zone in GISS emission inventory should be reduced.

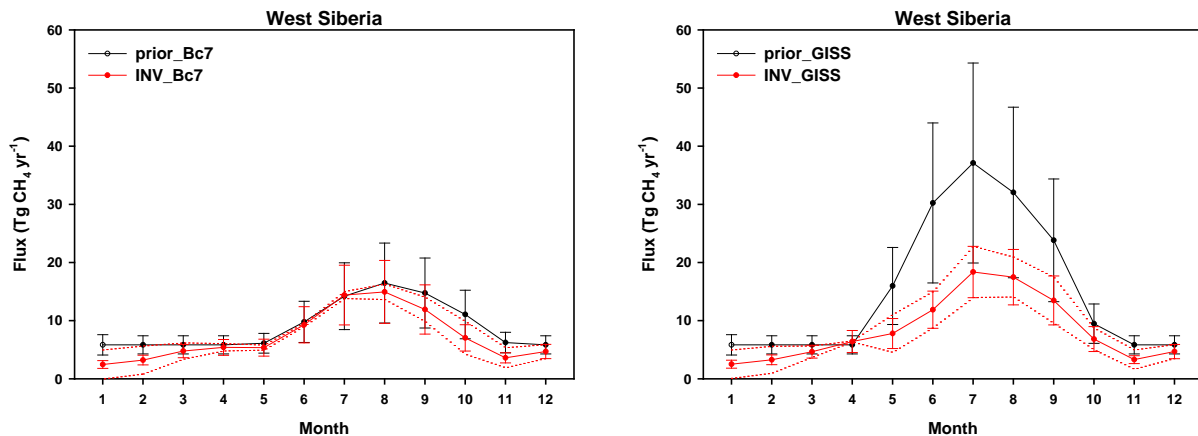


Figure 4. Seasonal variation in the prior and inversed CH<sub>4</sub> fluxes (Tg/yr) of West Siberia in INV\_Bc7 and GISS. Black dots and error bars, the prior flux and its uncertainty; red dots and error bars, the inversed flux and its uncertainty; red dotted lines, the standard deviation of the inversed fluxes with different data uncertainties.

Although different wetland CH<sub>4</sub> emissions for West Siberia are used in INV\_Bc7 and INV\_GISS, similar seasonal variation of West Siberian CH<sub>4</sub> fluxes with a peak in Jun-Aug are estimated in two inversions by observational constraints. A difference between the annual CH<sub>4</sub> fluxes estimated in two inversions is smaller than the standard deviation of the inversed

fluxes with different data uncertainties in both two inversions. These results show robust regional estimates of CH<sub>4</sub> sources and sinks and suggest that the present inverse modeling is a robust method on regional CH<sub>4</sub> flux estimates.

#### 4 Discussion and Conclusions

We estimated seasonal CH<sub>4</sub> fluxes of West Siberia with the updated wetland emissions of Glagolev et al. (2010) covering the whole West Siberia. The annual mean flux is estimated to be  $7.3 \pm 1.5$  Tg/yr with a similar seasonal variation of the prior flux. Unlike the inversion (INV\_Bc7) with the updated wetland emissions estimated by in situ measurements of 30 sites and the detailed wetland classification of 20 wetland types, the inversion with GISS wetland emissions estimated by a few measurements for typical wetland types and the simplified wetland classification of five types shows the overestimated wetland emissions of northern taiga zone with large difference between the prior and inversed fluxes. These results suggest the significance of in situ measurements for various wetland types and the detailed wetland classification on the uncertainty reduction of wetland emission modeling. In addition to the seasonal cycle of West Siberian CH<sub>4</sub> flux, we could see the north-south gradient of wetland CH<sub>4</sub> emissions over West Siberia through evaluation of the updated wetland emissions using inverse modeling; stronger wetland CH<sub>4</sub> emissions in the southern West Siberia.

#### References

- Anisimov (2007), Potential feedback of thawing permafrost to the global climate system through methane emission, *Environ. Res. Lett.* **2**, 045016.
- Aselmann and Crutzen (1989), Global distribution of natural freshwater wetlands and rice paddies, their net primary productivity, seasonality and possible methane emissions, *J. Atmos. Chem.* **8**, 307– 358.
- Bloom et al. (2010), Large-scale controls of methanogenesis inferred from methane and gravity spaceborne data, *Science* **327**, doi:10.1126/science.1175176.
- Bousquet et al. (2006), Contribution of anthropogenic and natural sources to atmospheric methane variability, *Nature* **443**, doi:10.1038/nature05132.
- Dlugokencky et al. (2009), Observational constraints on recent increases in the atmospheric CH<sub>4</sub> burden, *Geophys. Res. Lett.* **36**, L18803, doi:10.1029/2009GL039780.
- Fung et al. (1991), Three-dimensional model synthesis of the global methane cycle, *J Geophys. Res.* **97(D7)**, 13033-14065.
- Glagolev et al. (2010), Methane Emissions from Subtaiga Mires of Western Siberia: The "Standard Model" Bc5, *Moscow University Soil Science Bulletin* **65(2)**, 86–93.
- Gurney et al. (2004), Transcom 3 inversion intercomparison: Model mean results for the estimation of seasonal carbon sources and sinks, *Global Biogeochem. Cycles* **18**, GB1010, doi:10.1029/2003GB002111.
- Kalnay et al. (1996), The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project, *Bull. Amer. Meteor. Soc.* **77**, 437-471.
- IPCC: Climate Change (2001), The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the third Assessment.
- Maksyutov and Inoue (2000), Vertical profiles of radon and CO<sub>2</sub> simulated by the global atmospheric transport model in: CGER supercomputer activity report, CGER-I039-2000 CGER NIES, Tsukuba, Japan, 39–41.
- Matthews and Fung (1987), Methane emission from natural wetlands: Global distribution, area, and environmental characteristics of sources, *Global Biogeochem. Cycles* **1**, 61– 86.
- Olivier and Berdowski (2001), Global emissions sources and sinks in *The Climate System* ISBN 9058092550 33-78.
- Patra et al. (2009), Growth Rate, Seasonal, Synoptic, Diurnal Variations and Budget of Methane in the Lower Atmosphere, *J. Meteor. Soc. Jpn.* **87(4)**, 635-663.

- Peregon et al. (2008) Map-based inventory of wetland biomass and net primary production in western Siberia, *J Geophys. Res.* **113**, G01007, doi:10.1029/2007JG000441.
- Smith et al. (2004), Siberian peatlands a net carbon sink and global methane source since the early Holocene, *Science* **303**, 353– 356.
- Shindell et al. (2004), Impacts of climate change on methane emissions from wetlands *Geophys. Res.Lett.* **31**(21), L21202.
- Sudo et al. (2002) CHASER: A global chemical model of the troposphere 1. Model description, *J Geophys. Res.* **107**, 4339, doi:10.1029/2001JD001113.
- Walter (1977), The oligotrophic peatlands of western Siberia—The largest peinohelobiome in the world, *Vegetatio* **34**, 167–178.
- Walter et al. (2001a), Modeling modern methane emissions from natural wetlands 1. Model description and results, *J. Geophys. Res.***106(D24)**, 34189–34206.
- Walter et al. (2001b), Modeling modern methane emissions from natural wetlands 2. Interannual variations 1982-1993, *J. Geophys. Res.***106(D24)**, 34207–24219.



# シベリアの森林火災発生状況と衛星データを用いたメタン放出量推定

小林 菜花子

人間文化研究機構 総合地球環境学研究所

## 1 はじめに

ロシアの北方林は、世界の森林面積の約20%を占め、陸域バイオマスの約25%を内包する (Conard et al., 2002)。その大部分はウラル山脈より東のシベリア地域に存在する。高緯度でかつ大部分が内陸性気候であるシベリアでは、温暖化がより顕著に進むと予想されており、それはすでに観測データにも現れはじめている。一般的には、その結果として高温が火災を増加させる方向に働くと考えられている (Soja et al., 2007)。降水量の増加などによって火災が減少するとの予測もある (Flannigan et al., 1998) が、現実にロシアにおける火災焼失面積は、1998年以降増加傾向にある (Soja et al., 2007)。また年輪調査から、火災の発生頻度が高くなってきていることも分かっている (Kharuk et al., 2005; Soja et al., 2006)。火災焼失面積の増加の要因には、数年前までのロシア経済の低迷や、それに伴う消火活動の縮小も関係している (IFFN, No.28, p15-17)。火災に対する温暖化の影響を見極めるためには、そのような人的要因がどのように変化していくかも、注視していく必要があるだろう。

現在、森林以外の植生を含む林野火災から排出される CO<sub>2</sub> の量は、全世界で 3431 百万トンと見積もられている (FAO, 2006)。これは化石燃料の燃焼によって排出される量の約 12% に相当する。火災による排出量のうち、42% がアフリカからと考えられているが、このような植物活性が高い地域で火災が起きた場合、植生の回復により CO<sub>2</sub> が再び大気から取り除かれるため、温暖化に寄与する割合は実際には少ない。一方シベリアやカナダの北方林では、回復が遅いばかりでなく、場所によっては凍土の融解によって再び森林が回復しないこともある。その場合、大気に放出された CO<sub>2</sub> は全て温暖化に寄与することになる。Randerson et al. (2006) は、北方林焼失後の地表面アルベドの上昇が入射太陽エネルギーを減少させ、放出した温室効果ガスの温室効果を打ち消して、かつ冷却方向に働くと予想している。しかしシベリアの凍土地帯では、森林被覆が大きく失われると、地面が暖まり長年蓄積されてきた有機物の分解が促進されることや、凍土が融解したあと沼地になって、浅部・深部からのメタンの放出が起こることなどから、問題はそれほど単純ではない。この複雑な問題にアプローチするためには、まず火災によって放出される温室効果ガスの量を正確に把握する必要がある。林野火災からの温室効果ガス放出量の見積もりには、未だ大きな誤差がある (Andreae and Merlet, 2001)。CO<sub>2</sub> 放出量に関する最大の不確定要素は、焼失バイオマス量である。この要素について、衛星や地上観測から得られる焼失面積と地上バイオマス量を元に、多くの研究者が推定精度の向上に取り組んでいる。

一方、火災によって第二の温室効果ガス CH<sub>4</sub> が発生することはあまり良く知られていない。しかし、火災からの CH<sub>4</sub> 放出量は、全ての発生源からの放出量の約 10% を占め (IPCC, 2007)、シベリアの火災からの放出量は多い年でそのうちの 18% に達することもある (図 1, Global Fire Emissions Database, Version 3)。火災からの CH<sub>4</sub> 放出量推定に関する不確定要素には、焼失バイオマス量に加え CH<sub>4</sub> 放出係数が挙げられる。放出係数とは (乾燥) 燃焼バイオマス量に占める対象ガス放出量の割合である。この値は火災のステージや可燃物の燃焼時の水分などによって変化することが知られているが、火災現場での測定が困難で、データが不足していることから、植生タイプごとに平均的な値を用いることが慣例となっている。しかし近年、大気中の温室効果ガス濃度を精度よく測定できる衛星が複数打ち上げられている。そこで本研究では、温室効果ガス観測技術衛星「いぶき」(GOSAT) を初めとする、衛星データを用いたメタン放出比の導出方法を確立し、より正確なメタン放出量の推定を行うことを目的とする。

プロジェクトにおける本研究の役割は、近年のシベリアにおける林野火災の発生状況を調べ、炭素収支におけるその重要性を明らかにすることである。火災の発生は環境変化に伴う虫害の拡大や樹木の大量枯死に端を発している可能性があり、それら密接に絡み合った森林の劣化を総合的に調査することは、今後のシベリアが気候に与える影響を予測するというプロジェクトの目的を達成する上で、非常に重要である。また  $\text{CH}_4$  放出量の推定については、その過程で  $\text{CO}_2$  放出量の推定が必要不可欠である。植生-大気間の  $\text{CO}_2$  収支について、G1 は衛星データを用いた面的な推定、G2 はタワー観測を元にした鉛直一次元モデルの構築によってアプローチしている。しかし、地域全体の  $\text{CO}_2$  収支を求めるためには、火災を主とする突発的（非定常）発生源からの放出量を考慮する必要があり、本研究で推定する火災からの  $\text{CO}_2$  放出量を役立てることができる。また、広大な湿地や多くのガス田を内包するシベリアでは、メタン収支も重要な研究対象である。現在、インバース法による発生源分離が試みられているが、火災からの放出量推定精度を高め、初期値を正しく与えることは、インバース法による発生源分離の精度を高めることに繋がる。

以下、第2章では、本研究の解析対象地域と手法について説明する。第3章ではこれまでの解析結果を示し、第4章で現在明らかになっている問題点について考察する。最後に第5章でまとめを行う。

## 2 研究対象地域と手法

### 2.1 研究対象地域

火災発生状況の調査と温室効果ガス放出量の推定については、シベリア全域を対象に行う。一方、メタン放出係数の推定については、衛星データが密に得られた地域について、集中的な解析を行う。2009年のGOSAT打ち上げ以降では、プロジェクトで新しいタワーを設置したサハ共和国のウスティマヤ周辺と極東地域のマガダン周辺で、大規模な森林火災が発生している。これらの火災は長年に渡って断続的に続いたことから、多くのデータが得られた。また近年のロシアでは、森林火災のほかに湿地での泥炭火災が問題になっている。2002年、2010年のモスクワ周辺の泥炭火災は、大都市の交通網を麻痺させ、世界的ニュースとなった。この火災は干拓によって泥炭が乾燥した結果という人災の側面が強いが、今後西シベリアの大湿地でも、自然的・人為的どちらの要因によっても同様のことが起こりうる。そこで、森林火災と泥炭火災でのメタン放出特性の違いを明らかにするこ

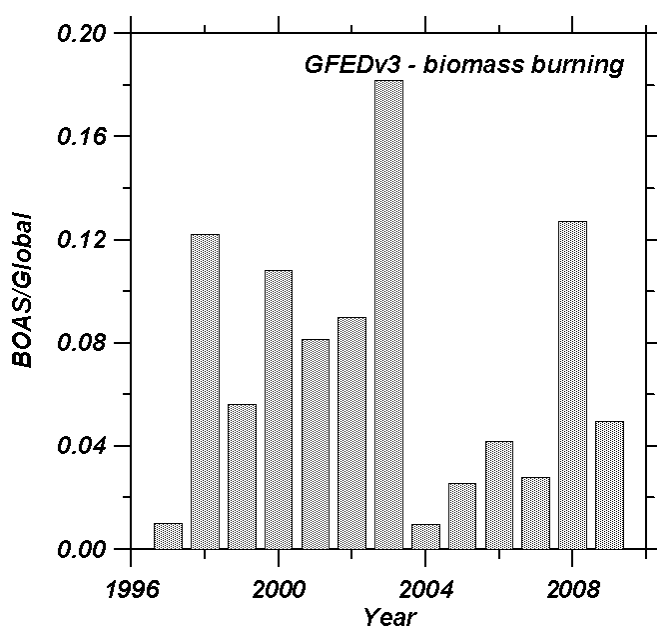


図1. バイオマス燃焼に関して、全世界でのメタン放出量に占めるシベリア地域でのメタン放出量の割合 (Global Fire Emissions Database, Version 3)。

とは重要であり、2010年のモスクワ周辺の泥炭火災について同様の解析を行う予定である。また、高緯度帯の火災と低緯度帯の火災を比較するため、南米・熱帯雨林での森林火災、インドネシア・湿地での泥炭火災などを比較対象とすることを考えている。

## 2.2 解析手法

火災発生状況については、TERRA/MODISから得られるホットスポットデータ (MOD14A1) とTERRA & AQUA/MODISから得られる焼失面積データセット (MCD45A1) を元に調査した。前者はMODISの熱赤外バンド (4  $\mu\text{m}$ , 11  $\mu\text{m}$ ) を用いて周囲より高温のピクセルを抽出する手法を用いており、後者は近赤外バンド (1.23  $\mu\text{m}$ , 0.84  $\mu\text{m}$ , 2.1  $\mu\text{m}$ ) を用いて地表面反射率が大きく変化したピクセルを抽出する手法を用いている。

火災からのメタン放出量 ( $M_{CH_4}$ ) は下記のような式で表される(Andreae and Merlet, 2001)。

$$M_{CH_4} = EF_{CH_4} \times M_{biomass} \quad (1)$$

ここで  $EF_{CH_4}$  はメタン放出係数、 $M_{biomass}$  は(乾燥) 焼失バイオマスの量である。通常、火災現場で  $M_{CH_4}$  の測定は困難であり、 $EF_{CH_4}$  を観測から直接求めることはできない。そこでメタン放出比 ( $ER_{CH_4}$ ) を測定して、 $EF_{CH_4}$  に換算することが良く行われる。 $ER_{CH_4}$  は下記のような式で表される。

$$ER_{CH_4} = \frac{[CH_4]_{smoke} - [CH_4]_{bg}}{[CO_2]_{smoke} - [CO_2]_{bg}} \quad (2)$$

ここで [ ] は濃度を表し、添え字の smoke は火災のプリューム内、bg は火災によって影響を受けていないバックグラウンドを意味する。(1)式と(2)式を整理すると、 $EF_{CH_4}$  は  $ER_{CH_4}$  を用いて下記のように求められる。

$$EF_{CH_4} = ER_{CH_4} \times EF_{CO_2} \times \frac{MW_{CO_2}}{MW_{CH_4}} \quad (3)$$

$EF_{CO_2}$  は  $CO_2$  放出係数で、森林では 1570-1580 (g/kg) 程度である。 $MW_{CO_2}$ ,  $MW_{CH_4}$  はそれぞれ  $CO_2$ ,  $CH_4$  の分子量である。

火災における  $ER_{CH_4}$  の導出に用いるデータは、2009年1月に種子島から打ち上げられた GOSAT の FTS センサが取得した  $CO_2$ ,  $CH_4$  のカラム平均濃度である。FTS センサが実際に取得するデータは、近赤外域の太陽光が大気中の気体分子に吸収されながら下方へ透過し、地表面で反射・散乱されて再び大気中を大気圏外へ透過したもののスペクトル強度である。このスペクトルから気体分子の量や濃度を推定することをリトリーバル処理と呼ぶ。得られるスペクトルの波数分解能が高ければ、高度分布を得ることが可能であるが、GOSAT/FTS では高い Signal-Noise-Ratio (SNR) を確保するため  $0.2\text{cm}^{-1}$  の波数分解能を持つ仕様となっている。そのため、光が透過した大気柱 (カラム) 中に存在する気体分子の総量 (気柱量) のみ得られる。気柱量は、測定地点の標高や大気の厚さによって異なるため、観測者にとって有用な値は気柱量ではなく濃度である。FTS の  $CO_2$ ,  $CH_4$  カラム平均濃度 (以下  $XCO_2$ ,  $XCH_4$ ) の精度は、スペクトルを得るための分光観測とその後のリトリーバル処理の正確さによって決まっている。2009年秋に初めてのデータ公開が行われて以降、宇宙航空研究開発機構(JAXA) と RA 研究者らによる分光スペクトルの補正や、国立環境研究所(NIES)と RA 研究者らによるリトリーバルアルゴリズムの改良により、大きなデータ改編が2度行われた。本報告書では、最新のデータ (V01.XX) を示す。NIES による検証によれば、GOSAT データの絶対値には  $XCO_2$  で 2-3%,  $XCH_4$  で 1-2% の過小評価の問題が残るが、南北の濃度差は正しく表現できる。しかし、場所的・時間的平均を施さない個々のデータについては、その精度はまだまだ明らかになっていない。そこで本研究では、SCIAMACHY や MOPITT など他の衛星のデータも用いて、

GOSAT データの精度を確認していく必要がある。また、GOSAT で得られるデータはカラム平均濃度であるため、(2)式に用いるための地表面付近濃度に変換するには、高度分布を仮定しなければならない。高度分布の推定にどのようなモデルを用いるかは、今後の課題として残されている。

FTS センサと共に GOSAT に搭載されている雲・エアロゾルセンサ (CAI) は地表面反射率を測定している。そこで、CAI の擬似トゥルーカラー画像を作成して地表面の様子 (雲や煙の有無) を確認する。また、濃度分布を解釈するため、NCEP/NCAR の気象再解析データ (NCEP Final Analysis, FNL) を合わせて用いる。

### 3 結果

#### 3.1 シベリアでの火災発生状況

シベリアでの主要な火災発生地域は、南部のカザフスタン・モンゴル・中国との国境地帯であり、ほぼ毎年のように火災が発生している。近年では、2000 年、2003 年に大規模な火災が発生し、その煙は日本や遠くアラスカにまで到達した。1998–2003 年の NOAA による Fire activity map (Goldammer et al., 2005) と、その後 MODIS で得られた焼失面積データの解析から、年々の変動は大きいものの、大規模な火災の発生が北東方向に広がっていることが分かった。実際、2002 年には、本プロジェクトで主要な調査対象地としているサハ共和国中央部のヤクーツク周辺で大規模な火災が発生した。その後ヤクーツク周辺で大きな火災はないが、新しく観測タワーを設置したサハ共和国東部のウスティマヤ周辺や、その東方のオホーツク海沿岸では、2008 から 2009 年にかけて大規模な森林火災が発生している。2010 年には、更に北方のマガダン州北部で大規模な火災が発生した。

次にヤクーツク周辺での火災に着目する。サハ共和国での 2002 年の火災のほとんどはヤクーツク周辺で発生し、MODIS の火災焼失面積データによれば、その面積は 175 万 ha に及ぶ。ヤクーツクの気象局で得られたデータによると、この火災の原因は、7 月を除いて春から秋まで継続した少雨と高温であると考えられる。前年 2001 年夏季の降水量も平年値の約半分と少なく、そのことも 2002 年の乾燥に拍車をかけたと考えられる。また、その他の原因として考えられるのが 1999–2001 年に発生した、カラマツ林のシベリアモスによる虫害である。この虫害はヤクーツク周辺では過去に例を見ない深刻さで、被害地域は西はレナ川西岸のヤクーツク周辺から東はレナ-アムガ河間地域までの広い範囲に及んだ (Troeva et al., 2010)。この蛾は、降水量が少ないと長距離を飛ぶことができ、集団で飛来して好みの植生を見つけ大量発生する。バイカル湖周辺で行われた調査では、シベリアモスの大量発生により枯死した森林の割合は 46% であり、その後草本や灌木が繁茂することによって火災が増加することが分かっている (Kharuk et al., 2003)。ヤクーツク周辺での 2002 年の大規模火災について、虫害との関係を含め、その原因を明らかにすることは、今後を予測する上で重要である。

#### 3.2 火災周辺での濃度分布

GOSAT で得られた濃度分布には、緯度や季節の違いに伴う変化の他に、多くの局所的・突発的な変化が見られた。このような変化は、火災以外にも大都市・工場排出などの点源によって生じると考えられる。そこでまず、濃度と同期して得られる CAI 画像に MODIS のホットスポットデータを重ね合わせながら、目視で火災による煙を特定した。2009, 2010 年夏には、世界的な火災多発地域であるアフリカや南アメリカで、例年と同様に無数のホットスポットが検知された。しかしこれらの地域では火災の規模は小さく、煙の量も少なかった。一方、東シベリアやカナダの北方林、モスクワ周辺やインドネシアの泥炭火災では、火災の件数は少ないものの、大規模で濃い噴煙を伴う火災が生じていた。

図 2 に、ウスティマヤ周辺の落葉針葉樹林地帯で、2009 年 7 月 30 日に得られた CAI の擬似トゥルーカラー画像と FTS の XCO<sub>2</sub> 分布を示す。赤点で示されているのは火災のホットスポットで、そこを起点に煙が幾本も北

西-北方向へ流れていることが見てとれる。FNL データによれば当時地上付近では南東-南風であったことから、画像データとの矛盾はない。メタン放出比を得るためには、バックグラウンド濃度と火災プルーム中濃度の差を正確に測定できなければならない。図 2 では火災の周辺で 9 点の濃度データが得られているが、火災近傍のデータがクオリティチェックで弾かれ、公開されていない。火災の風下側にある観測点は 100km 程度離れており、その濃度が風上側と比べて高濃度であるとは言えなかった。

一方、2010 年にモスクワ南東部で発生した泥炭火災では、煙プルーム中でもデータが多数得られた。図 3 にその一例を示す。左図は  $XCH_4$  について、GOSAT のプロダクトをそのままプロットしたものであるが、風上（北側）より風下（南側）で濃度が高いという傾向は見られなかった。この傾向は  $XCO_2$  についても、且つ他の日についても同様であることから、明らかに測定上の問題であると考えられる。最も可能性が高いのは、 $CO_2$  や  $CH_4$  のカラム量を濃度に変換するとき用いる、乾燥空気カラム量の見積もり誤差である。最新のデータでは、この乾燥空気カラム量を酸素の A バンドから求めているが、その波長域がメタンの観測波長域と大きく離れているため、誤差が存在する可能性がある。そこで、SCIAMACHY の  $CH_4$  データに対して行われているのと同様に (Frankenberg et al., 2005)、 $CO_2$  の気柱量で補正した  $XCH_4'$  を計算した。その補正式は下記のように表される。

$$XCH_4' = \frac{CLA_{CH_4}}{CLA_{CO_2}} XCO_2' \quad (4)$$

ここで CLA はカラム量を表し、 $XCO_2'$  は簡単のため 370ppm で固定とした。図 3 右図にその補正值を示す。この補正により、風上と風下ではっきりと濃度差が現れた。火災の影響により、 $XCO_2'$  は風上より風下で大きいと考えられるので、実際の  $XCH_4'$  の濃度差は更に大きいと思われる。モスクワ南東部火災の全てのデータについて同様の処理をしたところ、プルーム中の  $XCH_4'$  が図 3 右図のように増加する場合と減少する場合が存在した。増加する場合はメタンの増加率が高く、減少する場合についてはメタンの増加率が低いことを表していると考えられる。

## 4 考察

2010年夏、レナ川東岸のテュングリュアラス周辺が深刻な虫害に見舞われたとの報告があった（Personal communication, 凍土研フョードロフ博士）。気象データを調べると、夏の中盤から後半にかけて雨が少なく高温であったという点で、2010年は大規模火災前の2001年と類似点が見られた。従って、2002年の大規模火災発生メカニズムについて明らかにすると共に、新しい虫害の規模や範囲を調べ、次の乾燥年にどのような影響が現れるか注視する必要がある。2006年以降の湿潤化で枯死した樹木も、乾燥時には火災に対し虫害による枯死木と同様の役割をすると考えられるため、その規模や範囲についても調査が必要である。

衛星データを用いたメタン放出比の算定は、データのクオリティが定まらないため、これまで困難であった。また、ウスティマヤで得られたデータから、煙を伴うような大きな規模の火災であっても、ある程度風下では拡散により濃度差が検出できないレベルになってしまうことが分かった。火災近傍でのデータを取得するには、公開されていない（クオリティの保証されていない）データを特別に要求し、更にその精度を確認しなければならないという難しさがある。今後データ要求をしていくと共に、他の衛星データとの比較をしたり、井上・川崎教授の地上検証研究と協働するなどして、データのクオリティを確認していく。それと平行し、(4)式中の $XCO_2$ に関するモデル推定を行い、プルーム中と周囲でのメタン濃度の差を正しく導出した上で、メタン放出比の計算を試みる。この推定には、オイラー型・ラグランジュ型モデル双方の使用を検討している。しかしどのようなモデルを用いても推定には不確実性が伴うため、検証実験を経て煙中の $XCO_2$ 、 $XCH_4$ を精度良く求める手法を確立し、メタン放出比の計算を行うのが理想的である。今後のJAXAやNIESによるデータクオリティの向上にも期待したい。

## 5 おわりに

シベリアにおける林野火災発生の推移について調査した。1990年代後半から2010年にかけて、大規模な火災が発生する地域は北方へ広がっている。しかし今後、温暖化にともなう高温で火災が増加するという見方や、降水量が増加し火災が減少するという見方があるなど、将来の予測は定まっていない。近年生じている大規模な虫

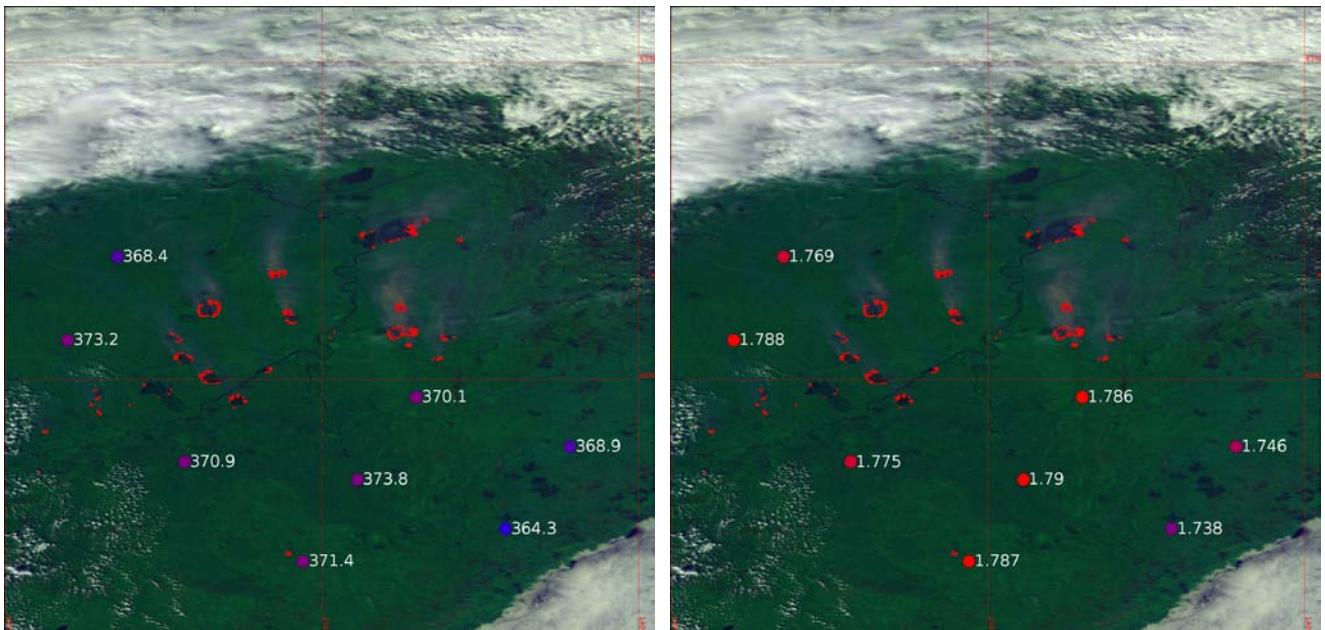


図2. ウスティマヤ上空で得られたGOSAT/CAIの擬似トゥルーカラー画像とGOSAT/FTSの $XCO_2$  (左図)、 $XCH_4$  (右図) 分布(2009年7月30日)。プロットは濃度に比例した色づけがされている。

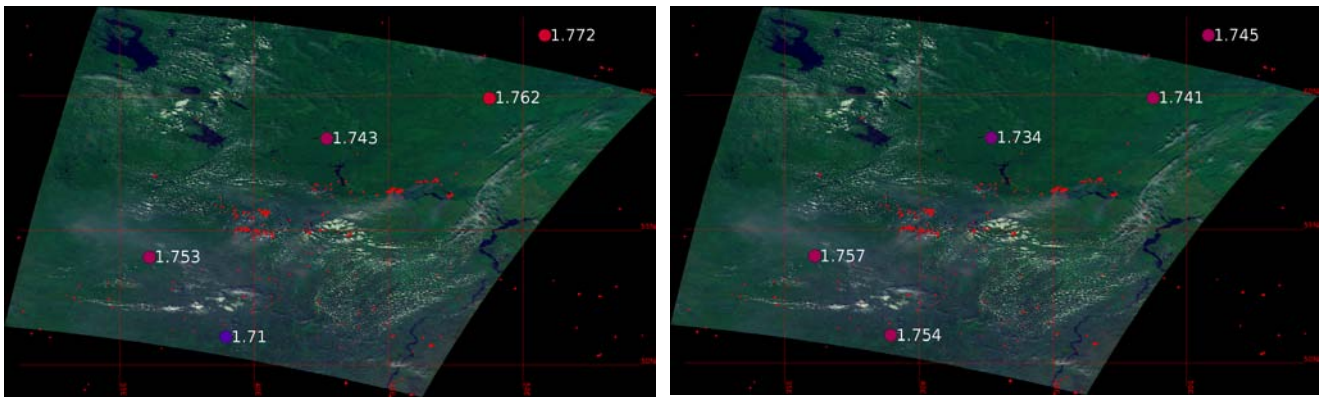


図 3. 2010 年 8 月 14 日に得られた、モスクワ南東部の火災の様子と XCH<sub>4</sub> 分布。左図は GOSAT の酸素バンドから算出された乾燥空気気柱量でエアマス補正して得られた値、右図は補正式(4)から得られた値。プロットは濃度に比例した色づけがされている。

害や湿潤化による樹木の枯死が今後どのような頻度で生じるかも、火災規模や頻度の行方を左右する重要な要素である。ヤクーツク周辺の 2006 年以降の湿潤化、2010 年の虫害による枯死の規模や範囲を特定し、過去との比較から将来の火災を予測したいと考えている。

一方、シベリアにおける林野火災の地球温暖化に対する寄与を調べるため、不確実性の高い CH<sub>4</sub> 放出量について、衛星データを利用した精度の良い定量化を目的に研究を進めている。GOSAT データは 2009 年秋に公表されて以降、リトリバルの問題点が大幅に改善されてきた。最新のデータでは、絶対値には問題があるものの、CO<sub>2</sub> 濃度と CH<sub>4</sub> 濃度の比に火災による濃度上昇が反映されていることが、解析により明らかになってきた。今後、モデル推定を組み合わせ、メタン放出比の計算を行っていききたい。

#### 参考文献

- 有山 悠子、衛藤 聡美、野口 克行、林田 佐智子 (2009): 衛星センサーSCIAMACHY による全球メタン観測について、*天気*, **56**, 3-11.
- Andreae, M. O. and Metlet, P. (2001): Emission of trace gases and aerosols from biomass burning. *Global Biogeochem. Cycles*, **15**, 955-966.
- Conard, S., Sukhinin, A., Stocks, B. J., Cahoon, D. R., Davidenko, E. P. and Ivanova, G. A. (2002): Determining effects of area burned and fire severity on carbon cycling and emissions in Siberia. *Climatic Change*, **55**, 197-211.
- FAO (2006): Fire management global assessment 2006.
- Flannigan, M. D., Bergeron, Y., Engelmark, O. and Wotton, B. M. (1998): Future wildfire in circumboreal forests in relation to global warming. *J. Veg. Sci.*, **9**, 469-476.
- Frankenberg, C., Meirink, J. F., van Weele, M., Platt, U. and Wagner, T. (2005): Assessing methane emissions from global space-borne observations. *Science*, **308**, 1010.
- Goldammer, J. G., Sukhinin, A., and Csiszar, I. (2005): The current fire situation in the Russian Federation: Implications for enhancing international and regional cooperation in the UN framework and the global programs on fire monitoring and assessment. IFFN, 32.
- IPCC (2007): IPCC Fourth Assessment Report (AR4)
- Kharuk, V. I., Dvinskaya, M. L. and Ranson, K. J. (2005): The Spatiotemporal Pattern of Fires in Northern Taiga Larch Forests of Central Siberia. *Russ. J. Ecol.*, **36**, 302-311.

- Randerson, J. T., Liu, H., Flanner, M. G., Chambers, S. D., Jin, Y., Hess, P. G., Pfister, G., Mack, M. C., Treseder, K. K., Welp, L. R., Chapin, F. S., Harden, J. W., Goulden, M. L., Lyons, E., Neff, J. C., Schuur, E. A. G., Zender, C. S. (2006): The impact of boreal forest fire on climate warming. *Science*, **314**, 1130-1132.
- Soja, A. J., Tchepakova, N. M., French, N. H. F., Flannigan, M. D., Shugart, H. H., Stocks, B. J., Sukhinin, A. I., Parfenova, E. I., Chapin, F. S., and Stackhouse, P. W. (2007): Climate-induced boreal forest change: Predictions versus current observations. *Global Planet. Change*, **56**, 274-296.
- Soja, A. J., Shugart, H. H., Sukhinin, A., Conard, S. and Stackhouse, P. W. (2006): Satellite-derived mean fire return intervals as indicators of change in Siberia (1995--2002). *Mitig. and Adapt. Strateg. Global Change*, **11**, 75-96.



## G1b (気候解析チーム) 活動の一側面

### ー 全球の気候変化におけるシベリア ー

神沢 博

名古屋大学大学院 環境学研究科

#### 1 はじめに

本シベリアプロジェクト「温暖化するシベリアの自然と人—水環境をはじめとする陸域生態系変化への社会の適応—」における気候解析チーム (G1b) のプロジェクト全体への貢献は、以下のようなことだと考えられる。

提供情報：気候変化や植生変化の描像

対象地域：シベリア域を中心とする北半球高緯度

期間：過去 (約 50-100 年前) から将来 (約 100 年後)

手法：既存・進行中研究のレビュー、新たなモデル開発・解析

ここでは、気候 (気温、水蒸気量、降水量など) の変化について、過去 100 年・現在・将来 100 年の時間範囲で、本プロジェクトが対象とするシベリアを全球の中で位置付ける試みの一端を述べることで、さらに、気候変化のシベリアへの影響の一端を記述することを目的とする。本稿では、その目的に合致すると思われる既存・進行中研究の結果の図を紹介することを主とする。

#### 2 気候値の全球分布 (観測平均値)

##### 2.1 地上気温

図 1 に地上気温の 20 年平均値の全球分布 (ERA-40 データ) を示す (友松, 2007)。シベリアは、南極大陸、グリーンランドに続き、北極海、カナダ北部と並ぶ寒冷な地域である、という良く知られた事実を確認できる。

##### 2.2 可降水量 (水蒸気量)

図 2 に、水蒸気の気柱量 (鉛直方向に積分した量) すなわち可降水量 (左上：NVAP データ 12 年間平均)、飽和水蒸気量の気柱量すなわち「飽和可降水量」 (上右：JRA25 データ 12 年間平均)、可降水量を飽和降水量で割った量すなわち「相対可降水量」 (下左) を示す。また、日降水量 (下右：GPCP データ 7 年間平均) を示す (桑原, 2007)。シベリアの可降水量は、5~10 mm 程度であり、他の高緯度域と同様に低い値を取る (気柱量でも「乾燥」している)。南極大陸やグリーンランド (5 mm 以下) ほど低くはない。飽和可降水量は、クラウジウス・クラペイロンの式で定まる荷重をつけた気温の鉛直積分量であるといえる。シベリアの可降水量は、10~20 mm 程度であり、他の高緯度域と同様に低い値を取る。南極大陸やグリーンランド (10 mm 程度以下) ほど低くはない。「相対可降水量」は、概して全球で一様で、値は約 70%程度である。シベリアもその一様なうちに入る。もちろん、5、6 か所ほど 30%程度と乾いた地域もある。降水量は、シベリアは少ない領域に入る。

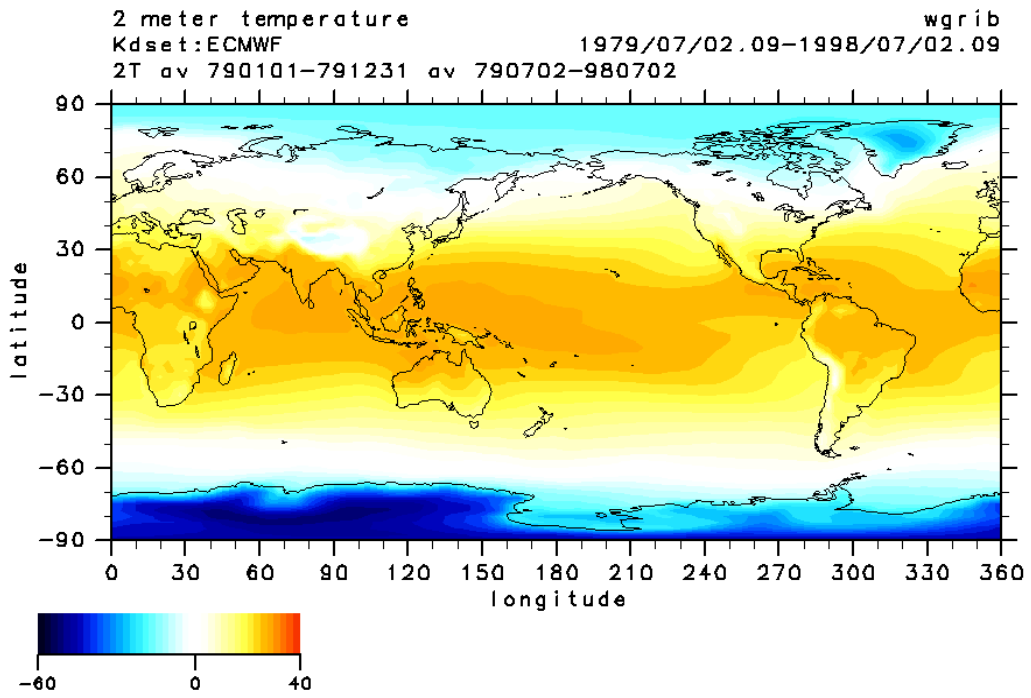


図1 地上気温の20年平均値 (友松, 2007)

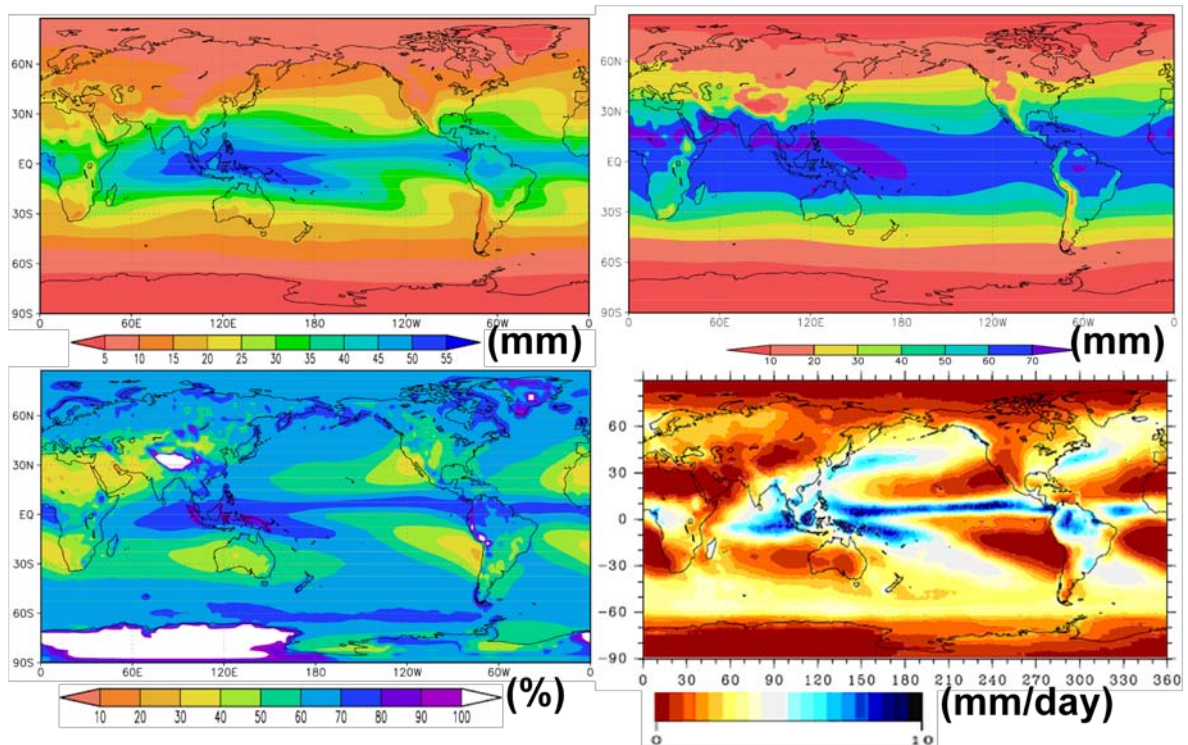


図2 上左：可降水量 (水蒸気の気柱量) 上右：飽和可降水量 下左：「相対可降水量」 (ここまでの3つの図：12年間平均) 下右：日降水量 (7年間平均) (桑原, 2007)

### 3 20世紀のトレンド

#### 3.1 地上気温

図3は、20世紀後半（正確には、1979年から2005年にかけての27年間）の地上気温のトレンドを四季に分けて示す（IPCC, 2007a）。昇温トレンドは、シベリアの北半球春（MAM）が北アメリカ・欧州の北半球冬（DJF）とともに、最大であり、+1°C/decade程度である。シベリアの昇温トレンドは北半球秋（SON）にも大きい。

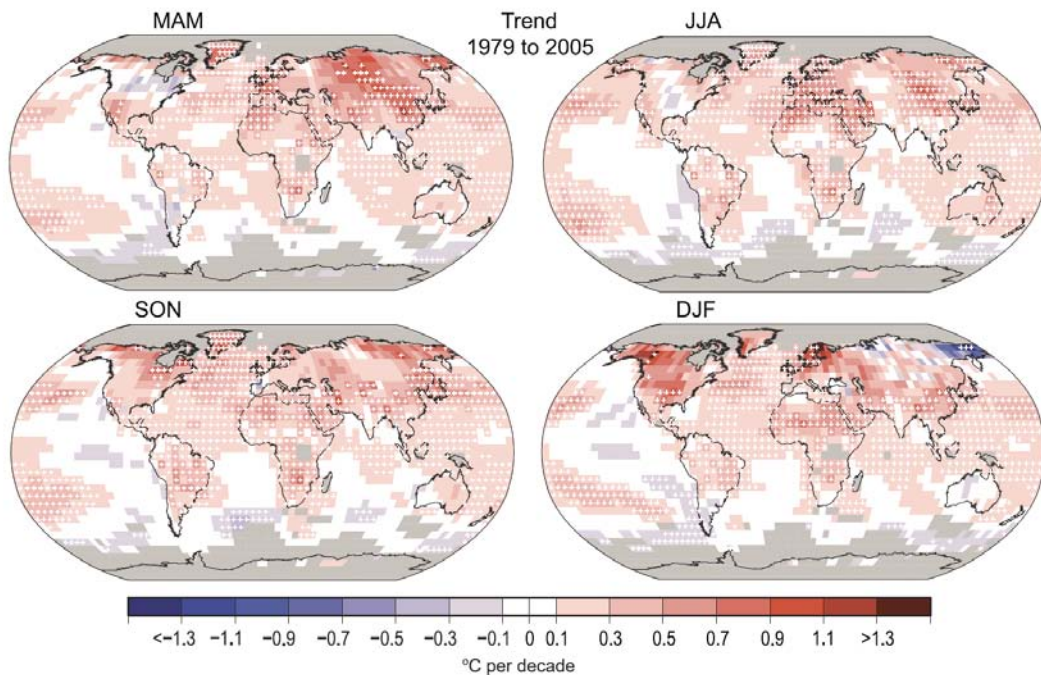


Figure 3.10. Linear trend of seasonal MAM, JJA, SON and DJF temperature for 1979 to 2005 (°C per decade). Areas in grey have insufficient data to produce reliable trends. The minimum number of years required to calculate a trend value is 18. A seasonal value is available if there are two valid monthly temperature anomaly values. The dataset used was produced by NCDC from Smith and Reynolds (2005). Trends significant at the 5% level are indicated by white + marks.

図3 地上気温のトレンド（IPCC, 2007a）

#### 3.2 降水量

図4は、20世紀（正確には、1900年から2005年にかけての106年間）の年間降水量のトレンドを示す（IPCC, 2007a）。シベリアは、信頼のおけるトレンドを出すにはデータが不十分な地域が多い（図中のグレー）。シベリアのほとんどを含む North Asia (50-70N, 40-180E) 域の年間降水量の時系列データが図の右側上から2番目に示されている。年間降水量は、平年値（1961-1990の30年間平均値）が455 mmとこの図では Alaska の322 mm について低く（最高は Southeast Asia の2455 mm）、100年間に平年値の10%程度の増加があったことを示す。

Figure 3.14. Precipitation for 1900 to 2005. The central map shows the annual mean trends (% per century). Areas in grey have insufficient data to produce reliable trends. The surrounding time series of annual precipitation displayed (% of mean, with the mean given at top for 1961 to 1990) are for the named regions as indicated by the red arrows. The GHCN precipitation from NDCG was used for the annual green bars and black for decadal variations (see Appendix 3.A), and for comparison the CRU decadal variations are in magenta. The range is +30 to -30% except for the two Australian panels. The regions are a subset of those defined in Table 11.1 (Section 11.1) and include: Central North America, Western North America, Alaska, Central America, Eastern North America, Mediterranean, Northern Europe, North Asia, East Asia, Central Asia, Southeast Asia, Southern Asia, Northern Australia, Southern Australia, Eastern Africa, Western Africa, Southern Africa, Southern South America, and the Amazon.

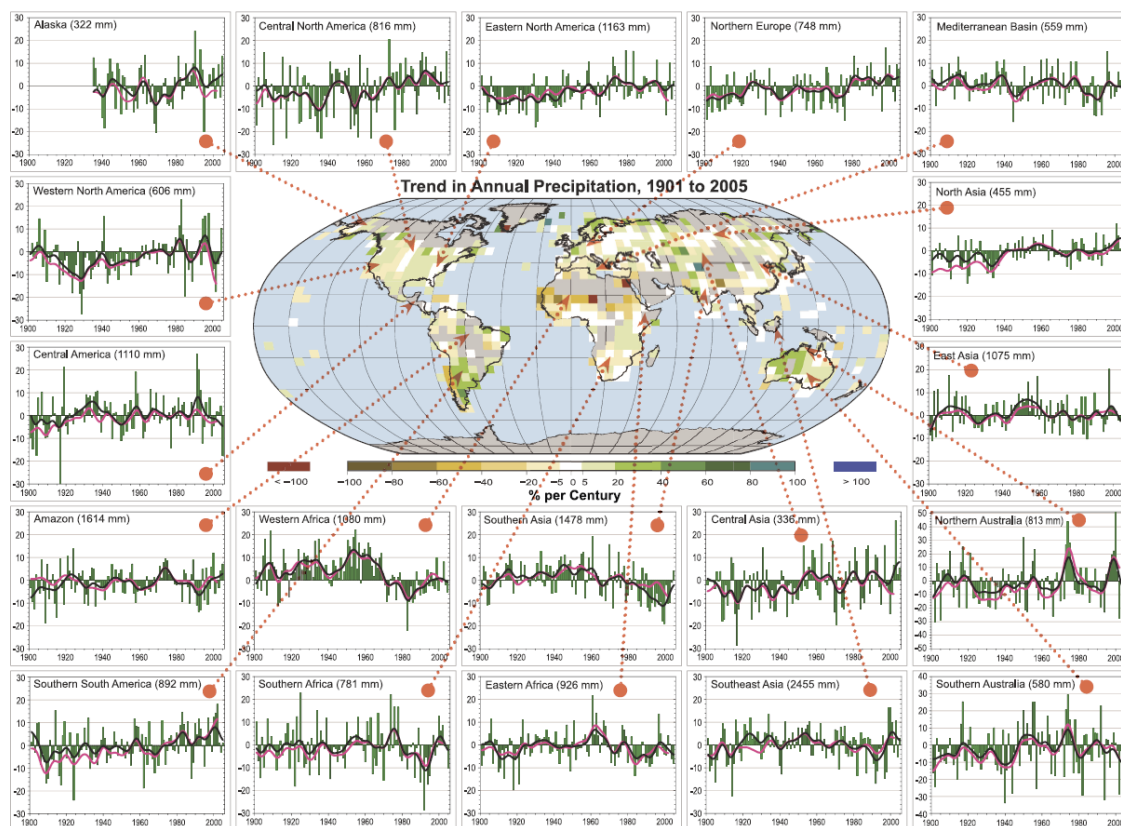
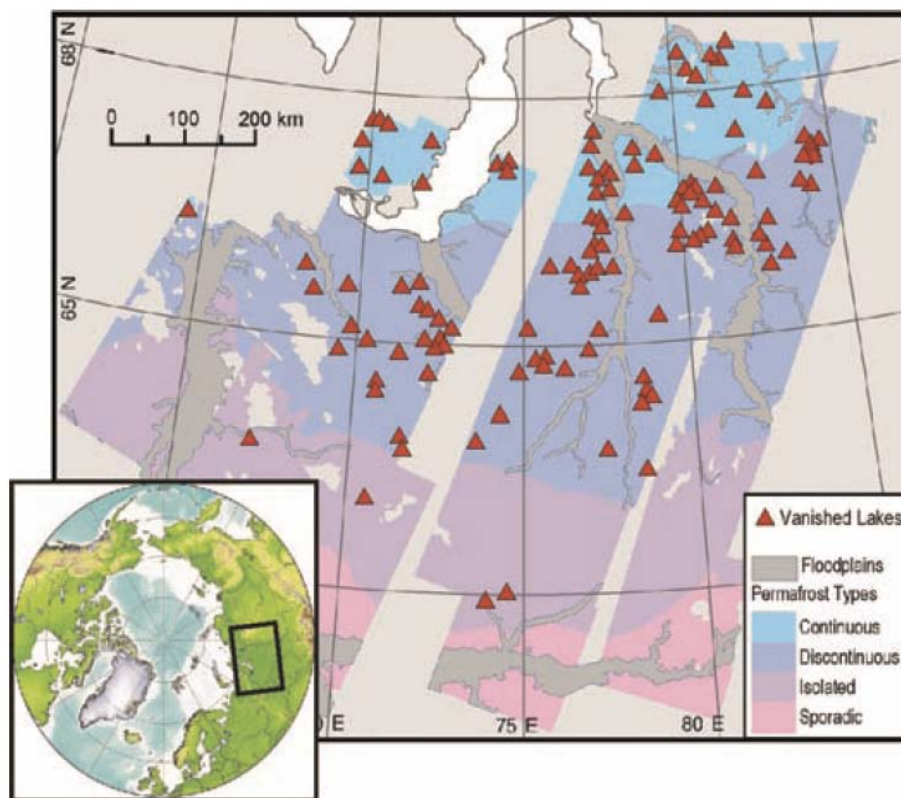


図4 降水量のトレンド (IPCC, 2007a)

### 3.3 シベリアの湖の消失

図5の赤△印は、シベリア西部で湖が消失した場所を示す (IPCC, 2007b)。1970年代初期には存在していたが、約30年後の1997-2004の8年の間には無くなってしまったことが、衛星画像データから推測された。この30年間に土壌温度および地上気温の上昇があったことがわかっており、図の湖消失の位置と様々な永久凍土タイプの分布とを照合すると、永久凍土が解けることが、湖の底の透水性を増すことになり、湖の水が土壌に流れ出したために、湖が20世紀末の30年間に消失してしまったことが示唆される。



**Figure 15.4.** Locations of Siberian lakes that have disappeared after a three-decade period of rising soil and air temperatures (changes registered from satellite imagery from early 1970s to 1997-2004), overlaid on various permafrost types. The spatial pattern of lake disappearance suggests that permafrost thawing has driven the observed losses. From Smith et al., 2005. Reprinted with permission from AAAS.

図5 シベリア西部での湖の消失 (IPCC, 2007b)

## 4 21世紀の将来見通し

### 4.1 地上気温・降水量

図6は、アジア域の地上気温と降水量の20世紀後半(1980-1999の20年間平均)から21世紀後半(2080-2099の20年間平均)への変化を示す(IPCC, 2007a)。21世紀のSRES A1B排出シナリオ(森田, 1999)を、空間3次元の気候モデルである大気海洋大循環モデル(Atmosphere-Ocean General Circulation Model: AOGCM)に与えた数値計算結果のうち21個のマルチモデルデータセットの平均である。シベリアに注目する。地上気温(図の上)は、冬(DJF)が+6~8°C程度の昇温であり、夏(JJA)に比べると大きい。降水量(図の中)は、冬(DJF)が+30%程度の増加であり、夏(JJA)に比べると大きい。21個のモデルのうち降水量の増加を示すモデル数(図の下)は、冬(DJF)はほとんどの地域が21と全てあり、夏(JJA)に比べると多い。

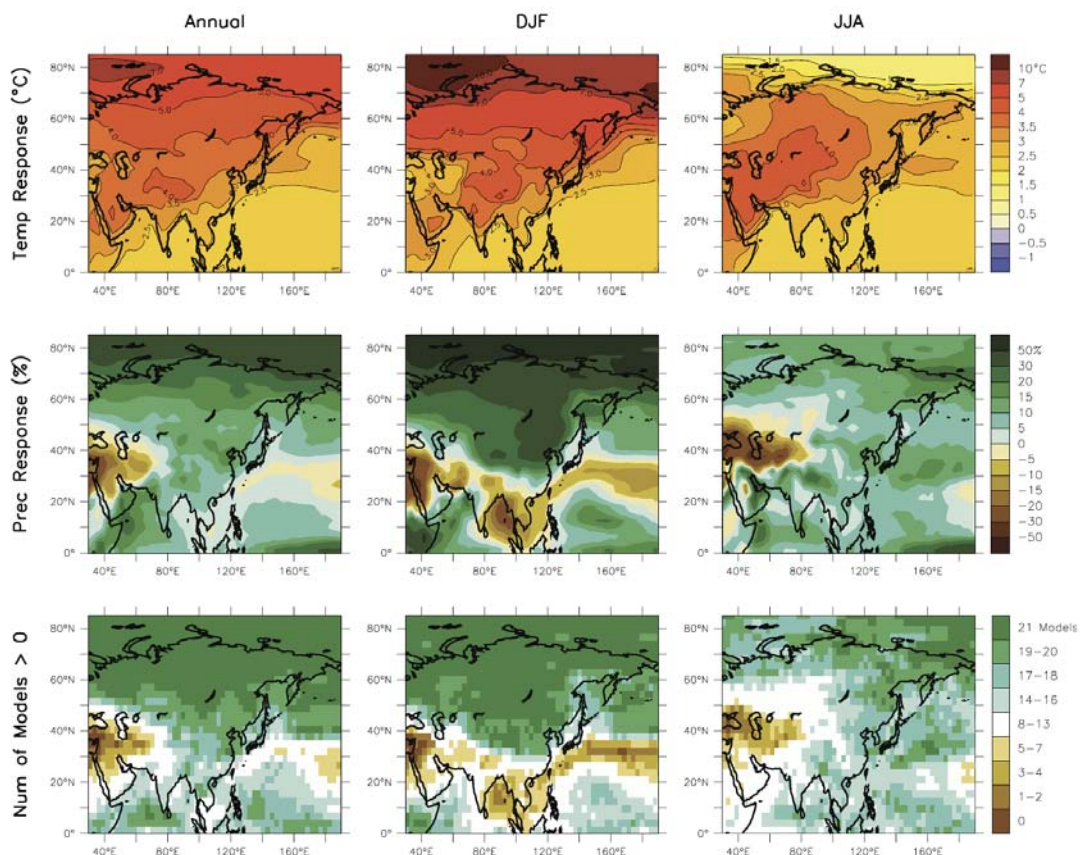


Figure 11.9. Temperature and precipitation changes over Asia from the MMD-A1B simulations. Top row: Annual mean, DJF and JJA temperature change between 1980 to 1999 and 2080 to 2099, averaged over 21 models. Middle row: same as top, but for fractional change in precipitation. Bottom row: number of models out of 21 that project increases in precipitation.

図6 地上気温と降水量の将来100年の変化 (IPCC, 2007a)

#### 4.2 地上気温の頻度分布

本節は、将来見通し実験とは異なる平衡実験の結果であるが、参考となる情報があると考え、設けた。図7は、大気大循環モデル CCSR/NIES/FRCGC AGCM 5.7 (水平解像度：約 110 km) を用いた以下の2つの平衡実験によって計算された地上2 m 日平均気温 (本節では、地上気温と呼ぶ) のデータから作成した頻度分布を示す (友松, 2007)。

二酸化炭素濃度を 345 ppmv に固定 ( $1\times\text{CO}_2$ ): 20 年間

二酸化炭素濃度を 690 ppmv に固定 ( $2\times\text{CO}_2$ ): 20 年間

対象地域は、図の右上の地図の長方形で囲まれた北半球高緯度地域であり、シベリアの大部分が含まれている。2 $\times\text{CO}_2$  を 1 $\times\text{CO}_2$  と比べた結果をまとめると以下のとおりである。

- 地上気温の時間変動の変動幅が顕著に減少する。地上気温の 90 percentile 値 (任意のデータの頻度分布の面積を 10 等分したとき上位から 1 番目のデータ値) と 10 percentile 値の差が、約 35°C から約 41°C へと増加する。
- 地上気温の 10 percentile 値が約 10°C 上昇する。一方、90 percentile 値の上昇は約 4°C であり、比較すると小さい。低温側の上昇の方が高温側の上昇に比べて大きいという、地球温暖化の議論でよく出てくる特徴がここでもみられる。平均値の上昇は約 4°C である。

・本節で定義した Warm event Increase (WI) は、高温現象の発生頻度の増加の指標であり、 $1\times\text{CO}_2$  の高温現象 (90 percentile 値より高い現象と定義) の発生頻度が  $2\times\text{CO}_2$  では何倍になるかを示す指標である。Cold event Decrease (CD) とは、低温現象の発生頻度の減少の指標であり、 $1\times\text{CO}_2$  の低温現象 (10 percentile 値より低い現象と定義) の発生頻度が  $2\times\text{CO}_2$  では何倍になるかを示す指標である。WI が 1.8、CD が 0.15 である。CD がほぼ 0 であり、低温現象の発生頻度が顕著に減少することを示す。

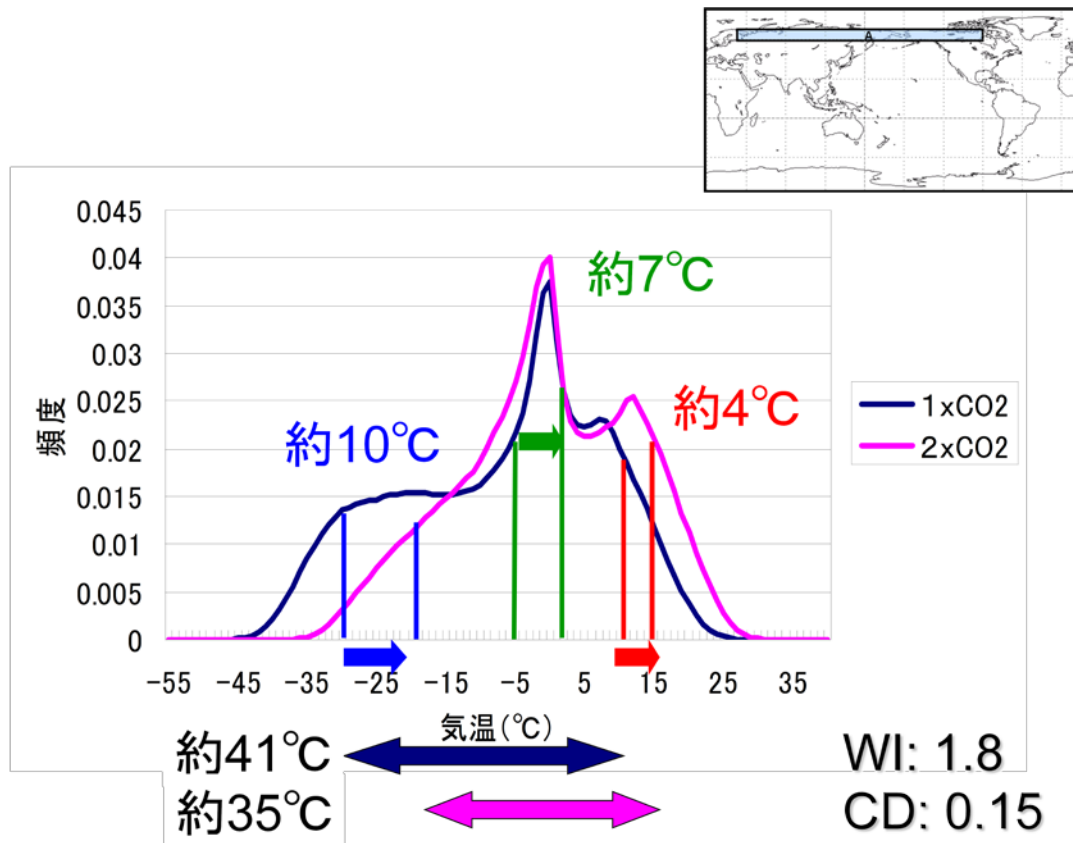


図7 地上気温の頻度分布の  $2\times\text{CO}_2$  と  $1\times\text{CO}_2$  との比較 (友松, 2007)

#### 4.3 永久凍土

図8は、北アジアでの永久凍土の2100年までのSRES A2排出シナリオ(森田, 1999)の元での変化を示す(IPCC, 2007b)。太実線は、永久凍土の現在の南限境界。茶色部分は、2100年には永久凍土が解けてしまう可能性が非常に高い場所。黄色部分は、永久凍土が様々なステージで品質低下にさらされる見通しである場所である。



**Figure TS.11.** Projected future changes in the northern Asia permafrost boundary under the SRES A2 scenario for 2100. [F10.5]

図8 永久凍土の21世紀の変化 (IPCC, 2007b)

## 5 IPCC AR5 における 21 世紀の将来見通しに関する気候モデル実験

IPCC AR5 (5<sup>th</sup> Assessment Report) を 2013 年に印刷すべく活動が進められている。IPCC AR5 へインプットすることを主な目的として、文部科学省の「21 世紀気候変動予測革新プログラム」によって、スーパーコンピューター Earth Simulator 2 を活用した研究が下記のように進められている。

(1) 近未来：高解像度大気海洋結合モデルによる近未来予測実験: up to ~2035

MIROC (AORI (U Tokyo) + NIES + JAMSTEC): Atmosphere-Ocean General Circulation Model (AOGCM): Atmosphere coupled with Ocean ; 格子間隔 (メッシュ) : 大気 60 km, 海洋 20 km

(2) 長期変動：地球システム統合モデルによる長期気候変動予測実験: Up to ~2300 years

MIROC-ESM (JAMSTEC+MIROC group): ESM (Earth System Model): MIROC coupled with Carbon Cycle ; 大気~200 km, 海洋~100 km

(3) 極端現象：超高解像度大気モデルによる将来の極端現象の変化予測に関する研究

MRI (JMA): Atmosphere General Circulation Model (AGCM) ; 全球 20 km, 日本付近 5 km, 1 km



これらの研究は、WCRP/CMIP5 (Coupled Model Intercomparison Project Phase 5) に参加し、気候モデル実験データは、PCMDI (Program for Climate Model Diagnosis and Intercomparison) にアーカイブされ、世界へ提供される。また、PCMDIに収まりきれない大量のデータに関しては、文部科学省の「データ統合・解析システム DIAS (Data Integration & Analysis System):」によって、データのアーカイブおよび提供が行われる予定である。

## 6 おわりに

自分の知識の整理も兼ねて、本シベリアプロジェクトに関連深そうな既存の研究の成果を、IPCC AR4 および身近な修士論文からみつくり、それらを簡単にスケッチしてみた。不十分なスケッチとなってしまったが、本プロジェクトの参加者の方々にほんの少しでも参考になることがあれば幸いである。

## 参考文献

IPCC (2007a): Climate Change 2007: The Physical Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report (AR4) of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), S. Solomon et al., Eds., Cambridge University Press, 996pp.

IPCC (2007b): Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report (AR4) of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), M. Parry et al., Eds., Cambridge University Press, 976pp.

桑原崇浩 (2007): 観測および再解析データから得られる可降水量の全球分布の時間変動. 名古屋大学環境学研究科修士 (理学) 論文, 68pp.

森田恒幸 (1999): 地球温暖化と経済. 「大気環境の変化」(岩波講座地球環境学3), 第6章, 岩波書店, 249-279.

友松一樹 (2007): 地球温暖化に伴う地上気温の頻度分布の変化. 名古屋大学環境学研究科修士 (環境学) 論文, 63pp.

## 動態植生－凍土複合モデル(DV-FSM)による

### タイガ（寒帯林）・凍土結合系の維持と変動の機構

張 寧寧	名古屋大学大学院 環境学研究科
安成哲三	名古屋大学 地球水循環研究センター
太田岳史	名古屋大学大学院 生命農学研究科

永久凍土または非永久凍土に生育する東ユーラシア大陸の森林は、およそ 600 万 km<sup>2</sup> という広大な面積を占める。寒帯林・亜寒帯林であるこの地域の森林は、全球または地域レベルでの水循環・エネルギー循環・炭素循環 (WEC) や気候システムにおいて感度が高く、重要な役割を果たしていることがこれまでの研究で示されてきた。カラマツが優先種であるタイガ (寒帯林) の分布は、連続的または非連続的な永久凍土帯と非常によく一致する。言い換えるならば、カラマツに代表されるタイガと永久凍土は広大な寒冷圏における共生的な生態 - 気候システムとして機能していると考えられる。

本研究ではまず、植生モデルとして FAREAST を用いた。森林 gap モデル FAREAST は立木の配置と動態をシミュレートするモデルである。このモデルを用いて、異なった温暖化シナリオ条件に対する東ユーラシア大陸の非永久凍土帯の森林の応答の調べた数値実験結果により、気温・降水量の変化量により、森林の動態が大きく変わることが示唆された。東ユーラシアの森林が現在の森林構造とバイオマス量を維持するのは気温変化の幅が小さい時に限られた。特に落葉性広葉樹は気候変化シナリオ下で東ユーラシア大陸での生育域を増加させたが、カラマツ (*Larix*) やトウヒ (*Picea*) といった針葉樹は大きな気候変化で急激に減少し、それらの分布も減少した。マツ (*Pinus*) の全バイオマス量は全地域で減少が見られなかった。

東ユーラシアの広域の森林をシミュレートするために拡張した FAREAST では、土壤の凍結過程をシミュレートできず、そのため永久凍土上のタイガ (寒帯林) の分布の再現はできなかった。そこで、森林と永久凍土の相互作用をシミュレートし、地球温暖化に対するタイガ - 永久凍土の応答を評価するため、植生動態モデルに凍結土壌を組み込んだモデル (DV-FSM) を開発した。この新しいモデルによる現在の水文気候条件を与えた数値実験では、カラマツが優先種であるタイガや、タイガと永久凍土間の相互過程うまく再現することができた。この数値実験によって、東シベリアの現在の気候条件下ではカラマツ林は永久凍土の融解をコントロールし、永久凍土はカラマツに十分な水分を供給しているタイガ・凍土結合系を形成していることが示された。永久凍土過程がない場合、カラマツは生き延びることはできず、より乾燥した気候条件に耐えることのできるマツなどのほかの樹種がカラマツの代わりに支配的になった。山火事はカラマツに代表されるタイガを維持する付加的役割を果たすことも明らかになった。温暖化感度実験によると、この共生系は 2 °C 以上の温暖化条件下では維持できないことが示された。この条件下では亜寒帯林 (dark conifer や他の落葉性の種) が永久凍土過程と切り離され、優先種となって繁栄することが示された。

これらの数値実験により、将来的な地球温暖化が、タイガ・永久凍土結合系を含むユーラシア大陸北部森林相変化と、それに関連する水・エネルギー・炭素循環過程を通して、気候へのフィードバックに大きく影響する可能性が示唆された。

# G1c (ロシア政治経済研究チーム) 報告

## ー ロシアの政治経済情勢とエネルギー戦略 ー

杉本 侃

欧亜総合研究所  
ロシア極東総合大学函館校  
環日本海経済研究所 (ERINA)

### 1 ロシアの政治経済情勢

#### 1.1 最近のロシア政治の潮流

2012年に大統領選が行われる。大統領と首相のいずれが立候補するのか、その辺りを占う前提として2人の比較をしてみる価値はあると思う。

#### 資金源

「財布」、即ち「資金源」について言うと、プーチン氏は「資源」絡みである。プーチン氏が大統領に就任した時、彼は前任者が資源業界とつるんでファミリー（政商）を形成していたことを快く思っていなかったため、「通信産業」を金づるに出来ないか考えていた節がある。

2000年9月に初めて日本を訪れた折に通信大臣をお伴にしていたことがそれを物語っている。確かに、日本の通信業界はロシアに関心を持ち、NECなどが様々な協力を行った。

しかし、「通信」と「資源」ではそもそも資金規模が異なる。後者の場合、数十億ドル規模のプロジェクトが幾つもある。日本が絡んでいるサハリン大陸棚開発事業は、いずれも投資総額は200億ドルの規模になる。動く金が大きければ、儲けも大きい。

そこで、プーチンさんはエネルギー人脈を強めて行くことになる。石油天然ガス産業に対する関与を深めて影響力の行使を図るとともに、自分の竹馬の友や盟友が自分との関係を梃子に使うことでエネルギー業界とその関連業界（造船、建設他）、金融部門など経済の中核に割り込むことを認めた。

他方、メドヴェージェフさんは出身は同じ法科であるが、その後のキャリアは前任者とは異なり、その流れで親しい仲間は法曹界に多く、プーチンさんの不正を暴く術にはなっても、金にはならない。

#### 人脈

プーチンさんの人脈は、自らの出身母体との関係が深い。国家保安委員会（いわゆるKGB）とサンクトペテルスブルグの2つが人的関係のベースになっている。即ち、シロヴィキ<sup>i</sup>（内務・治安畑）に分類される人たちがそれであり、それに加えて、先にも触れたが「盟友」（遊び仲間）<sup>ii</sup>やオリガーキー<sup>iii</sup>（新興財閥）がいる。前者は政治や軍事に大きな影響力を行使できる人たちである。後者は前述の通り、資金源になる人たちである。

他方、メドヴェージェフさんの人脈で有力者と言えば、大学同期のA.イヴァノフ（最高商事裁判所長官）、大学は別だがYu.チャイカ（検事総長）やA.コノヴァロフ（司法相）などがある。上述した通り、金には縁遠い人たちである。

## 汚職への取り組み

この問題では基本姿勢には2人に共通のものが見られるものの、現実の取り組みとしては対照的と見て良い。

プーチン首相は大統領時代に年次教書で贈収賄撲滅を最大の課題の1つに据えたことがある。2006年の教書では、冒頭1ページに汚職追放が喫緊の問題として取り上げられ、恐らく経済界のみならず一般市民も行政の恣意的な権限行使に悩まされていたので、具体的な措置が採られることを期待した。しかしながらその後の動きはそれとは逆、即ち業界と癒着する方向に向かった。

他方、メドヴェージェフ大統領は自らが長となる対策委員会を設置し、汚職構造に本格的に対決する姿勢を明確に示している。しかしながら、今のところ目立った効果は無いどころか、贈収賄の金額は増えていることが報告されている。

大統領は幾つもの具体策を講じつつあるので、前任者との差別化を図る意図は感じられる。

## 地域政策

地方首長は大統領が任免権を実質的に支配している。現大統領は前任者任命の知事のうち34知事を罷免したことは、独自色を強調することでダミーではないことを示す試みと言える。但し、首都モスクワ市長についてはプーチン派が任命されたことは、両者間の微小な関係を物語るのかも知れない。

## 国際関係

プーチン時代はロシアが主導権を握れない国際機関とは距離を置く政策が採られたと見て良い。WTOやエネルギー憲章条約、OPECなどを見れば明白である。WTOは加盟を何度も約束しながら、条件が満たさなかったことが背景にあるとしても、国際経済体制と協調しようとする積極的な姿勢は見られなかった。ガス版OPEC（ガス輸出国フォーラム=Gas Exporting Countries Forum）でも、ロシアは改編してイニシアティブが取れるようになってから正式メンバーとなった。

メドヴェージェフ大統領は当初西側と協調的な政策を採ると見た向きが多い。ここでその検証はしないが、WTOについては加盟の見通しが報道されている。

## 大統領選

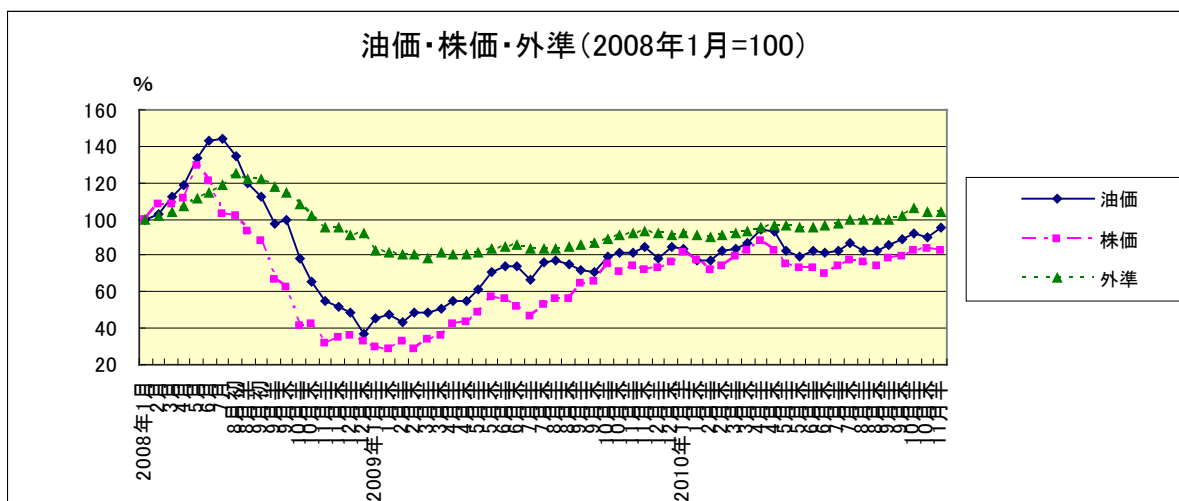
2012年3月に行われることになると思われる。次期大統領はプーチン氏の胸三寸に掛かっている。政権与党の党首（プーチン氏）が指名する人物が選ばれることは、現状では間違いのないと言えるからである。従って、両者が激突するシナリオは考え難い。阿吽の取引が成立するかも知れない。

因みに、信頼度に関する世論調査の結果では、最近では首相が50%内外、大統領は40%前半にあり、差は5%ポイント程度である。信頼せずは双方5%程度でしかない。なお、他の人物については、いずれも10%以下の信頼度に過ぎず、現段階で大統領候補になり得る可能性は低い。

## 1.2 ロシア経済の近況

2008年にロシア経済は2つの出来事の影響を強く受けた。その影響を3つの指標、株価、油価および外界準備高で見ることにする（添付の図表は2008年1月を100とした推移である）。

1つは2007年央に米国で起きたサブプライムローン問題を受けて、2008年半ばに株価が、続いて油価が下落し始めたことである。株価（ロシア取引システムの指標）は2007年5月19日に最高値の2,487.92を示したが、信用不安に真っ先に反応して下げ始めた。油価は同年7月19日に139.87ドルに高騰した後同じように落ち始めた。



もう1つの要因は2008年8月8日、北京オリンピック開会式に起きた出来事である。グルジアがロシアに軍事侵攻したのである。その日を選んだ理由は、プーチン氏を含む世界の首脳が開会式に列席し、ロシア軍の指揮が遅れると見たと言う説があるが、彼は直ちに行動して戦線に赴いていた。グルジア側に非があることは後日判明するのであるが、戦争に嫌気が差した外国資本がロシアから流出し、外界準備高が1週間で300億ドルも減ったのである。外準は2006年半ばにロシアは日本、中国に次ぐ世界第3位の地位を占めるに到っていた。それまではアジア勢がトップ5を占めていたが、その一角をロシアが崩したことになる。

同年9月15日に米国で起きたリーマンブラザーズ倒産は世界同時不況を起し、ロシアもその影響から逃れることは出来なかった。

図表に見る如く3つの指標は2008年末から翌年3月に掛けてボトムを記録した。

ロシア経済は良くも悪くも石油天然ガスに依存している。その油価が著しく下がったのだから、影響は甚大であった。

ロシア経済を別の側面から評価する。Sovereign fundである。主な原資は一言で言えばオイルマネー、即ち地下資源の生産税と輸出関税である。図表(次ページ)に「準備金」と「国民福祉基金」の流れを示した。

この2つの基金は2004年1月に「安定化基金」として設置されたものが、2008年2月に今の2つに分けられたものである。前者は経済危機において発動されることを、後者は別名「次世代基金」と呼ばれるように社会資本整備などの原資として利用されることが目的である。

この2つの基金は総額2,000億ドルに達したことがあるが、これは歳入規模に匹敵する。オイルマネーの果たす意味は極めて大きい。

準備金は2008年後半に1,400億ドルのレベルに達し、その後、本来の用途に従って産業の救済に充当され、現在では400億ドルの水準に下がっているが、併行して充填され続けている。国民福祉基金は2008年後半以降900億ドル弱のレベルを推移している。

油価がある程度の水準にあれば、これらの基金が底を着くことは無い。ロシア経済の強さはここにも見られる。

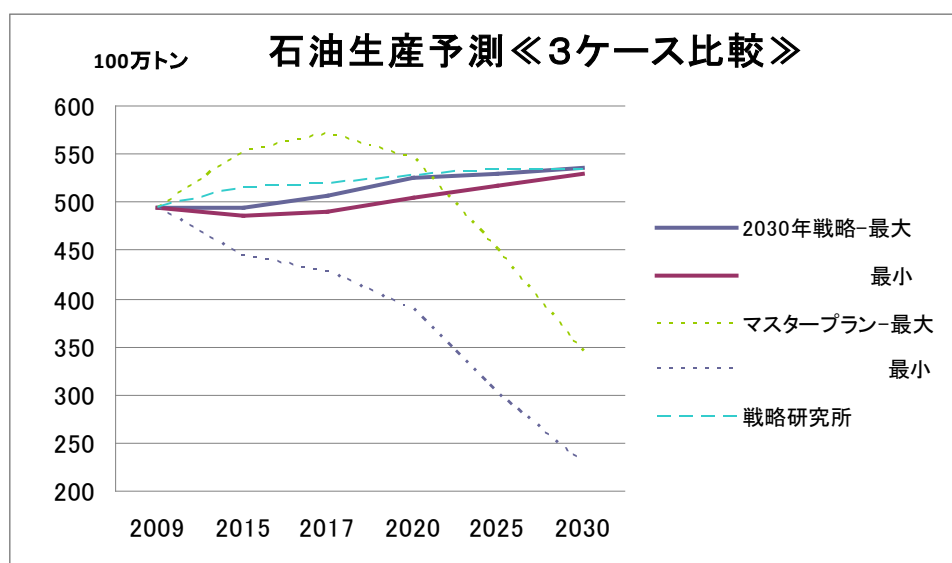
## 2 ロシアのエネルギー戦略

昨年の全体会議では「2030年までを対象期間とするエネルギー戦略」を紹介した。会議直前に同戦略が政府承認を受けたので、タイミングが良かった。今回も、実は石油産業と天然ガス部門の双方のグランドデザインの案が発表されたので、昨年の延長線でそれらに簡単に触れてみたい。

### 2.1 石油生産予測

図表をご参照下さい。「マスタープラン」の想定は誰が考えたのか、目的は何なのか、とても分かり難い気がする。

シュマトコ・エネルギー相は12月初めの記者会見で「ロシアは石油埋蔵量が220億トンを有し、5億トンの生産レベルを40年間維持することが出来る」と述べている。その一方で、「マスタープラン」は似ても似つかないデータを出している。

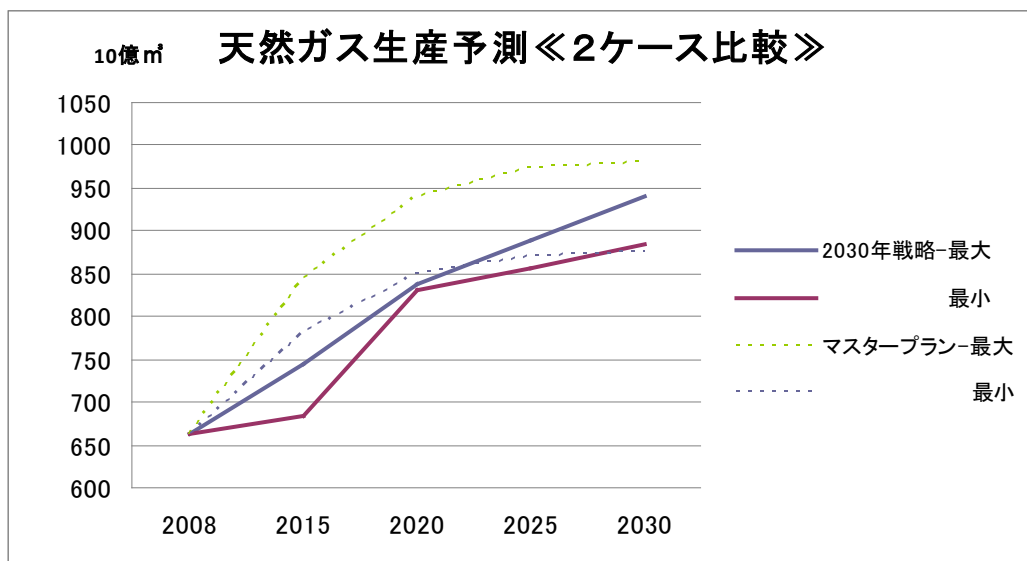


「戦略研究所」<sup>iv)</sup>は「2030年戦略」に近い予測を立てている。むしろ2010年代は「戦略」を上回る想定である。「マスタープラン」は現在政府で議論されており、最終的にどのようなものが出されるのか予断を許さないが、政府がこのまま何も手を尽くさなければこうなる、と言ういわば「政府恐喝案」のような感じを持つ向きがある。確かに、2億5,000万トンや3億5,000万トンでは国内需要を充たすにも輸入が不可欠になるであろうし、まして輸出で外貨を稼ぐことなど無理な話になり、経済への打撃は大きい。

### 2.2 天然ガス発展戦略

「天然ガス発展マスタープラン」が想定する生産予測を図表（次ページ）に示した。「マスタープラン」の最大ケースは「戦略」の想定を大きく上回る。最小シナリオは2020年ごろまでは「戦略」の高位値を超えるが、それ以降は伸びが低下して低位値の水準に収斂する。

最大と最小の差が「戦略」を遥かに超える大きさなので、現実性をどこまで踏まえた想定なのか疑問を禁じ得ない。欧州や中国などの需要を考慮すると、大き目の想定が必要なのかも知れない。天然ガスの「マスタープラン」も政府で議論中にあり、年内に発表されることも予定されているようである。

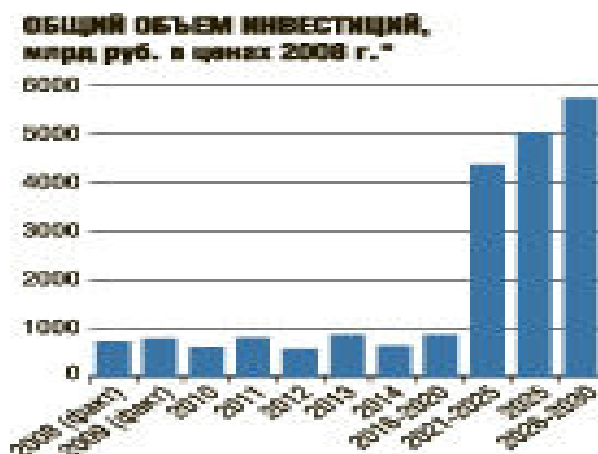


### 2.3 石油産業と天然ガス部門に対する投資計画

石油・天然ガス両産業に対する投資予測を、簡単に紹介する。

「マスタープラン」が想定する石油産業向け投資額は図表の通りである。

#### 石油産業に対する投資予測 (10億ルーブル)

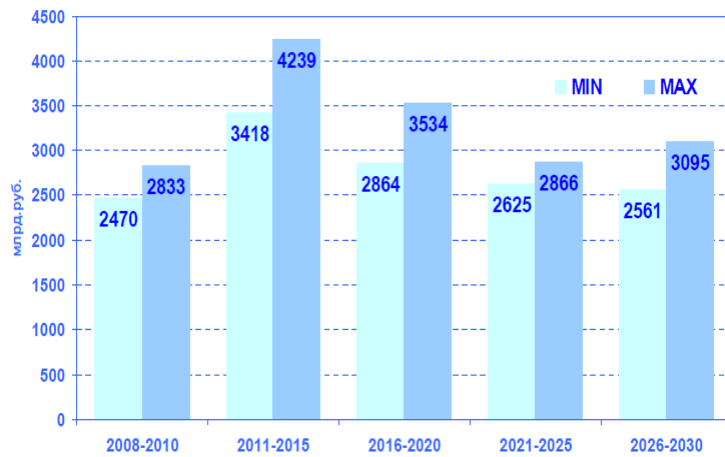


2020年までの投資額とそれ以降の投資額には大きな差がある。その意図が分かり難い。政府で承認されるまで、生産計画同様、全体像は見えてこないようである。ただ総額で15兆ルーブルを投じる必要があるようであるが、その実現には政府の役割が大きいように思える。例えば、基礎的な広域地質調査は国家資金で行う、企業が開発資金を捻出できるように生産税や輸出関税の変面措置を講じるなどの措置が必要と思われる。

「天然ガス発展マスタープラン」による投資予測を図表に示した。

2008年から2030年までの23年間で総額12.3兆～14.7兆ルーブルの投資が想定されている。年平均180億ドル弱～210億ドル余となり、これは「2030年戦略」の想定と比較しても過大なものとは言えない。

## 天然ガス産業に対する投資予測 (10億ルーブル)



現状で言えることは、いずれの計画も流動的であり、政府承認がなされるまではっきりした全体像は見えないということである。

<sup>i</sup> I. Sechin、V. Patrushev、両 Ivanov などに代表される。

<sup>ii</sup> G. Chimchenko、A. Rotenberg、Yu. Kovaljchuk などを指す。

<sup>iii</sup> O. Deripaska、V. Alekperov、R. Abramovich、A. Miller、V. Vekseljberg、S. Bogdanchikov などが代表的

<sup>iv</sup> 正確には「エネルギー戦略研究所」と称し、元々はエネルギー省の傘下であり、エネルギー戦略策定の中核的な役割を果たしてきたが、最近省から独立した。



G 2

【グループ 2 : 水・炭素循環グループ】



## G2a（古環境復元チーム）活動要約 — 年輪同位体を用いた過去の土壤水分量復元 —

杉本 敦子 北海道大学大学院 地球環境科学研究所

鄭 峻介 北海道大学大学院 環境科学院

米延 仁志 鳴門教育大学

G2a 班の目的は、これまでにわかっているヤクーツクにおけるカラマツ年輪の炭素同位体比と土壤水分の負の相関、および樹木生理、土壤水分変動過程の情報を利用して、過去の土壤水分を復元することである。ヤクーツクのカラマツ林では、過去 10 年分の詳細な気象および土壤水分の観測データが利用可能である。これらを用いて、カラマツの 10 年分の年輪データを解析し、年輪炭素同位体比と土壤水分の関係式を求めた。これを基にして、カラマツ林のカラマツ 2 個体の年輪同位体比から、過去 100 年分の土壤水分の変動を推定した。

推定した土壤水分は、過去の降水量の変動に対応して 1 年遅れで増減していた。永久凍土帯では、夏の終わりに存在する土壤水分は氷として翌年まで持ち越されるという特有の年々変化が見られることがわかっている。年輪から推定された過去の土壤水分は、これに調和的であり、妥当な結果である。一方で、気象観測所の過去の降水量の変動とあわせると、年々の変化に対応した土壤水分の増減はよく一致しているが、1975 年以降に見られる降水量の減少傾向とは一致しない。すなわち、1975 年頃を境として降水量は減少したのに対し、年輪 $\delta^{13}\text{C}$  から推定された土壤水分は 1975 年以降の方が多という結果となった。この原因は現段階では不明である。

土壤水分の変化は永久凍土帯特有の水循環プロセスのため、長周期の変動成分は必ずしも降水量と対応しないと考えられる。一方で樹木の生理学的な変化がこの矛盾をもたらした可能性もある。現在の推定値は 2 個体のカラマツで算出した暫定値であるため、早急に 4 個体の年輪 $\delta^{13}\text{C}$  を使用した推定値を求め確定値とし、長期変動成分に関する矛盾の原因を特定する。G2a で推定した土壤水分は G2c 班の計算結果と比較するが、年輪 $\delta^{13}\text{C}$  による土壤水分復元結果は、年々の土壤水分の増減に関するモデルの出力を検証するデータとしては利用可能である。一方、上に述べた長周期の変動成分の変動原因を解明するために、モデルで計算される変動の長周期成分とあわせて解析も必要であろう。また、G2b 班の蒸散と炭素固定のフラックスの季節変化も加味した解析もあわせて行なうことにより、土壤水分の復元データの精度を高めるとともに、土壤水分の変動と樹木の生長量の変動の関係についても情報を得ることが可能であると期待される。

# 樹木年輪炭素同位体を用いた東シベリアタイガ林の 過去の土壌水分量復元

鄭 峻介 北海道大学大学院 環境科学院  
杉本 敦子 北海道大学大学院 地球環境科学研究院  
米延 仁志 鳴門教育大学

## 1 はじめに

北半球高緯度域に広がる東シベリアタイガ林は落葉針葉樹であるカラマツが優占する大森林地帯である。その広大な面積により、エネルギー、水、炭素循環を通して全球的な気候に大きな影響を与えている(Bonan et al., 1992)。また、近年のフラックス観測により、タイガ林は森林の状態によって炭素の放出源にも、吸収源にも成り得ることが報告されている(Lindroth et al., 1998 ; Valentini et al., 2000)。地球の炭素貯蔵庫として重要なこの森林帯は内陸性の乾燥気候帯に広がる大森林地帯である。永久凍土上に成立し、地球温暖化の影響を大きく受ける可能性がある。それ故、このようなタイガ林の現在の状況を把握し、過去の環境や植生による炭素固定量の変動を復元することは全球の気候システムの理解に役立つと考えられる。

東シベリアのような乾燥気候帯に生育している植物は乾燥ストレスにさらされているため、それにより生長量が制限されていると考えられている。一方で、年輪解析では、年輪幅と夏の気温との相関が多数報告され、夏の気温が高く生長期間が長いほど生長が良いと報告されてきた(Barber et al., 2000)。しかしながら、20世紀中頃から、特に東シベリアでは、カラマツの生長量と気温の相関が悪くなっていることが報告され、乾燥による、水ストレスが1つの原因ではないかと考えられている(Briffa et al., 1998)。すなわち、東シベリアタイガ林では、水分環境が樹木の炭素固定量を規定してきた可能性がある。そうであるならば、この地域の過去、現在、及び将来の炭素循環を解明するために水循環の理解は欠かせない。

本研究では、この地域の過去の水分環境の復元を行うために、まず土壌水分等の現場の観測データがそろそろ約10年分の年輪の炭素同位体比と土壌水分の関係を調べ、それに基づき、過去100年に遡って土壌水分を復元することを目的としている。この地域に生育する落葉針葉樹であるカラマツの年輪 $\delta^{13}\text{C}$ 値を指標として利用するために、過去10年分の土壌水分量の観測データとカラマツ年輪 $\delta^{13}\text{C}$ の関係性を求めた。この関係性を利用し、過去100年間の土壌水分量の推定を試み、復元結果の妥当性について考察した。

## 2 研究対象地域と方法

### 2.1 研究対象地域

本研究では、ロシア・サハ共和国のヤクーツク郊外に位置する、スパスカヤパッド実験林(ロシ

ア科学アカデミー寒冷圏生物学研究所)のカラマツ林、アカマツ林、カンバ林において樹木年輪サンプルを採取した。ヤクーツクは北緯 62 度・東経 129 度に位置し、レナ川中流部にある。

観測を行ったスパスカヤパッド実験林は、その大部分が、カラマツが優占する森林で、カラマツ林のギャップにはカンバ(*Betula platyphylla*)、ハンの木、数種のヤナギが見られる。カラマツ林には、およそ 30m の観測タワーが存在し、GAME/Siberia(GAME は GEWEX-Asian Monsoon Experiment で GEWEX は Global Energy and Water Experiment の略)の観測期間に、フラックス観測、気象水文観測が開始された(Ohta et al., 2001)。カラマツの伐採地跡はカンバ林となり、カラマツへの更新過程にある。カラマツ林の約 400m 南には、乾燥した砂質土壤にアカマツ(*Pinus sylvestris*)林が存在し、カラマツとの混交林となっている。

この地域の気候は内陸性の気候で非常に乾燥している。年降水量は 200mm~300mm で、年々変動が大きく、それが土壤水分量の大きな年々変動を生み出している(Sugimoto et al., 2003)。また、気温の日較差・年較差が非常に大きい。年平均気温は-10°Cであり、夏季(6-8 月)の平均気温は 15°C 以上になり、年最高気温は 30°C 以上、年最低気温は-60°Cである。さらに、この地域は永久凍土帯に位置しており、乾燥時には永久凍土水循環システムが樹木の生長に必要な水分を供給すると考えられている(Sugimoto et al., 2002)。活動層の厚さはカラマツ林で約 1.2~1.4m、アカマツ林では約 2m 程度である。

## 2.2 樹木年輪のサンプリング

2007、2008、2009 年に、カラマツ林、アカマツ林、カンバ林において、日当たりの良いカラマツ、アカマツ、カンバを観測対象木として設定し、それぞれの樹木の胸高部位(120cm)から年輪サンプルを採取した。サンプルは、ディスク(円盤、もしくは円板)とコア(成長錐)の両方があるが、本研究で使用したものは、カラマツのディスクサンプルのみである。3.1 節で述べる土壤水分と年輪 $\delta^{13}\text{C}$ の関係は、比較的生長の良い 40~60 年の各サイト 4 個体の樹木年輪サンプルを用いた。3.2 節の過去 100 年の土壤水分量の復元は、カラマツ林のカラマツ 2 個体を用いた。

## 2.3 脱脂処理と炭素安定同位体比分析

採取したカラマツの樹木年輪サンプルは年輪幅測定後、医療用メスを用いて、実体顕微鏡下で各年の早材、晩材に切り分けた。各年の早材、晩材サンプルは、4 放射方向(東西南北)から切り分けたものを混ぜて使用した。切り分けた年輪サンプルに、次のような方法で脱脂処理を行った。各試料は 0.5~2mg を 6 ml バイアルビンに入れ、それぞれにアセトン溶液を 3ml 注ぎ、それを 20 分間超音波振動にかけた。その後一晩静置し、溶媒の除去後、サンプルの水洗いを 3 回行った。

凍結乾燥後、1 試料ずつ乳鉢ですりつぶして粉末状にし、4 方向の試料がよく混合されるようにし、0.5mg をスズ箔に包んだ。これらのサンプルを、北海道大学大学院地球環境科学研究院の元素分析計付質量分析計(deltaV, サーモフィッシャーサイエンス)を用いて分析を行った。分析には、アミノ酸のスタンダード(DL-Ala  $\delta^{13}\text{C}=-23.4\%$ , 及び、Tyr  $\delta^{13}\text{C}=-26.4\%$ )を用い、分析精度は $\pm 0.1\%$ である。

また、年輪 $\delta^{13}\text{C}$ に与える 1850 年以降の大気 $\text{CO}_2$ の $\delta^{13}\text{C}$ 低下による影響を取り除くために、

McCarroll and Loader. (2003)に従い、年輪 $\delta^{13}\text{C}$ クロノロジーに補正を行った。

## 2.4 気象水文データ

本報告書では、気象水文データとして降水量、土壌水分量の2つのデータを使用している。降水量データは、NCDC (National Climatic Data Center)のデータ、及び Yakutsk Hydromet observatoryのデータ(1953-2003の期間)を用いた。

土壌水分量は、本観測サイトのカラマツ林に設置した TDR (Moisture Point, Environmental Sensors Inc..Canada)のマニュアル観測の結果と、タワーサイトにおける自動測定システム(ACOS: Automatic Climate Observation System)の TDR の結果から推定された値(Sugimoto et al., 2003; Sugimoto et al., 投稿準備中)を用いた。TDR のマニュアル測定による土壌水分は、測定深度が、0-15, 15-30, 30-60, 60-90, 90-120cm の5深度である。TDR の観測結果から土壌水分を計算する方法の詳細は、Sugimoto et al. (2003)に述べられている。

## 3 結果と考察

### 3.1 年輪 $\delta^{13}\text{C}$ と土壌水分量：過去10年間の解析

本研究サイトのカラマツの一般的な早材と晩材の形成時期は、それぞれ6月初旬頃から7月中旬頃、7月中旬頃から9月初旬頃である。また、本サイトの土壌水分量の季節変動は極めて大きいため、早材と晩材の年輪 $\delta^{13}\text{C}$ に大きな差が生じる。このため、本研究では、各年の年輪を早材と晩材とに切り分け、それぞれの分析を行った。

1998年から2008年の期間のカラマツ林カラマツ(LL)、カンバ林カラマツ(BL)、アカマツ林カラマツ(PL)の早材と晩材それぞれの $\delta^{13}\text{C}$ について、土壌水分との比較を行った。土壌水分は、その年の6月、その年の7月、前年8月、前年夏後半(7/15-9/15)に分けて1日ごとの値を平均して求め、早材と晩材それぞれの $\delta^{13}\text{C}$ と比較した。

各サイトの早材の $\delta^{13}\text{C}$ は、その年の6月の土壌水分量とは相関がみられなかったが、その年の7月、前年8月、前年の夏後半の土壌水分量とは負の相関がみられた。先に述べたように、本研究サイトのカラマツの一般的な早材形成時期は6月初旬から7月の中旬であるが、6月は融雪水が表層土壌に入り、毎年非常に湿潤な状態になる。従って、6月の土壌水分量は早材の $\delta^{13}\text{C}$ に反映されないと考えられる。その後、7月に入ると融雪水は消費され、土壌は徐々に乾燥していく。そのため、早材の $\delta^{13}\text{C}$ とその年の7月の土壌水分量には弱いながらも負の相関がみられたと考えられる。一方、早材の $\delta^{13}\text{C}$ は前年夏後半の土壌水分量と明瞭な負の相関を示した。このことは、早材の $\delta^{13}\text{C}$ は前年夏後半の土壌水分量の影響を大きく受けることを示唆している。本研究サイトは永久凍土帯に位置しているために、前年夏後半の土壌水分は冬季には凍結し、翌年まで持ち越され (Sugimoto et al., 2003)、7月の土壌水分量は前年夏終りの状態の影響を受ける。また、カラマツは光合成により、前年夏後半に固定した炭素を翌年の早材形成に利用することがわかっている(Kagawa et al., 2006)。これらのことから、早材の $\delta^{13}\text{C}$ と前年の夏後半の土壌水分量の間にも負の相関がみられたと考えられる。

晩材の $\delta^{13}\text{C}$ にも早材と同様な関係が見られ、相関はより明瞭であった。すなわち、晩材の $\delta^{13}\text{C}$ はその年の6月の土壤水分量とは相関がみられず、その年の7、8月、及び夏後半の土壤水分量と明瞭な負の相関を示した。

以上の結果から、カラマツの早材の $\delta^{13}\text{C}$ は前年夏後半、晩材の $\delta^{13}\text{C}$ はその年の夏後半の土壤水分量とそれぞれ明瞭な相関があることが示された。そこで、これらの結果に基づき、両者を組み合わせて夏後半の土壤水分量の推定を試みる。その場合、ある年の晩材と、翌年の早材を組み合わせたのが妥当であると考えられる。例えば、2007年の早材と晩材を組み合わせて、2007年の1年分の年輪と考えると、早材は2006年の夏後半の土壤水分量を反映し、晩材は2007年夏後半の土壤水分量を反映し、両者から復元される土壤水分量の時期は一致しない。一方、2007年の晩材と2008年の早材の組み合わせで、2007年の1年輪とすれば、2007年の晩材は2007年夏後半の土壤水分量を、2008年の早材も2007年夏後半の土壤水分量を反映し、両者から復元される土壤水分量の時期が一致する。図1は、ある年の早材と晩材で1年輪とした場合、およびある年の晩材と翌年の早材で1年輪とした場合について、年輪 $\delta^{13}\text{C}$ と夏後半(7/15~9/15)の土壤水分量との相関をそれぞれ示したものである。予想通り、ある年の晩材と翌年の早材で1年輪を組み合わせた場合の方が、夏後半の土壤水分量との相関が高いことが分かる。なお、ここでは各年の年輪 $\delta^{13}\text{C}$ 値は各3サイト(カラマツ林カラマツ(LL)、カンバ林カラマツ(BL)、アカマツ林カラマツ(PL))の平均値を用い、また早材晩材を組み合わせて1年輪の $\delta^{13}\text{C}$ 値を計算するとき、年輪幅と年輪密度で重み付けした平均値を計算した。年輪の材密度は、Kagawa et al. (2003) によるこの地域のカラマツの早材および晩材それぞれに対する密度の平均値を用い、カラマツ林カラマツの早材、晩材は、それぞれ、0.393mg/mm、1.031mg/mm、アカマツ林カラマツの早材、晩材は、0.363mg/mm、1.051mg/mmとし、カンバ林カラマツ(BL)にはカラマツ林カラマツの密度と同じであると仮定した。

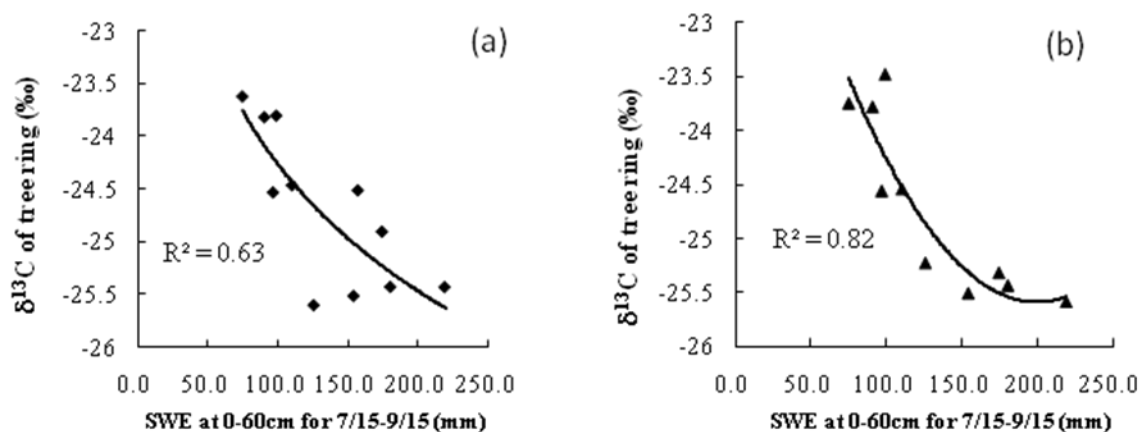


図1 年輪 $\delta^{13}\text{C}$ と夏後半(7/15-9/15)の土壤水分量の関係 (a)1年輪の $\delta^{13}\text{C}$ 値をその年の早材と晩材から計算 (b)1年輪の $\delta^{13}\text{C}$ 値をその年の晩材と翌年の早材から計算

### 3.2 年輪 $\delta^{13}\text{C}$ による過去100年間の土壌水分の復元

3.1節で過去10年間の観測結果との比較に使用したカラマツ樹木サンプルは40~60年程度の比較的若い樹木である。本節での過去100年の土壌水分量の復元には樹齢130年以上のカラマツ林のカラマツ2個体を用いて3.1節と同様の方法で年輪 $\delta^{13}\text{C}$ と過去10年分の土壌水分の回帰直線式を求めた。

$$SWE_{0-60\text{cm}}(\text{mm}) = -57.6 \times \delta^{13}C_{\text{tree-ring}} - 1224.8$$

ここで、 $SWE_{0-60\text{cm}}$ は0-60cmの水当量で表した夏後半7/15-9/15の土壌水分量(mm)、 $\delta^{13}C_{\text{tree-ring}}$ はある年の晩材と翌年の早材を組み合わせて、年輪幅と平均の材密度で重み付けして計算した1年輪の $\delta^{13}\text{C}$ 値である。この式を用いて年輪 $\delta^{13}\text{C}$ から推定した過去100年間の夏後半の土壌水分量の推定値、カラマツ生長期(6~8月)の積算降水量の変動を図2に示す。推定した過去100年間の土壌水分量は、数年程度の比較的短いタイムスケールで、大きな変動を示した。また、年輪 $\delta^{13}\text{C}$ から推定した過去100年間の土壌水分量の変動と、降水量の観測データを比較すると、両者の変動は1年のタイムラグをもち、よく一致していた。例えば、1950年は降水量が304.5mmと非常に多く、その翌年の1951年に土壌水分量155.3mmと大きく推定された。また、1979年は降水量が77.3mmと非常に少なく、その翌年の1980年には土壌水分量が74.7mmと小さく推定された。

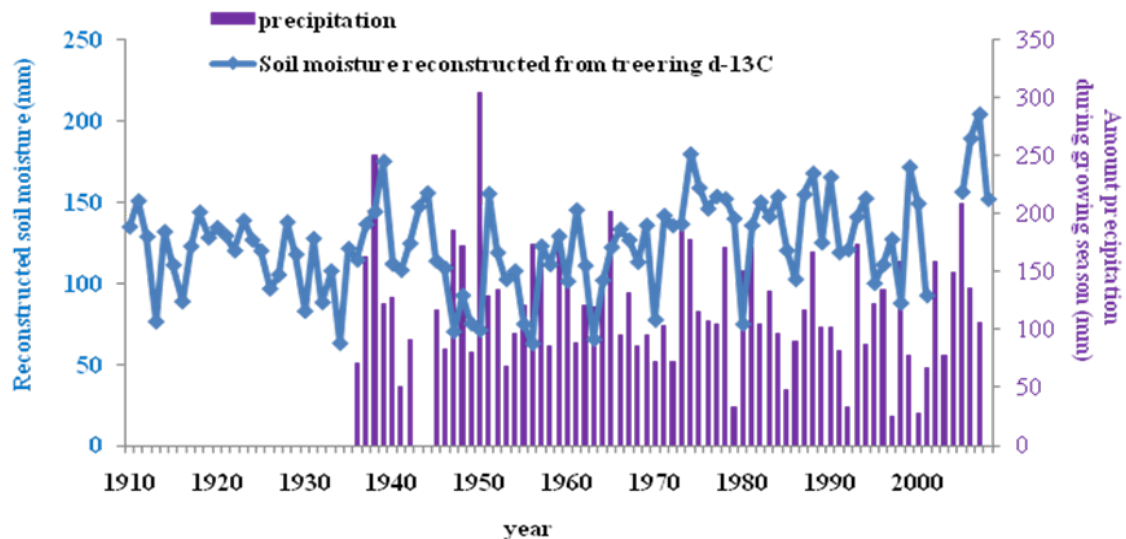


図2 年輪 $\delta^{13}\text{C}$ から推定した過去の夏後半7/15-9/15の0-60cm深の土壌水分量とカラマツ生長期(6-8月)の積算降水量。土壌水分は水当量(mm)で示した。

降水量と土壌水分量の変動が1年のタイムラグをもち、一致することは、本研究サイトにおいて Ohta et al., (2008) により行われた1998年から2006年の観測降水量、及び土壌水分量データの解析



結果と矛盾しない。本研究サイトは、永久凍土帯に位置しているために、ある年の夏後半の土壤水分は冬季には凍結し、翌年の春ごろまで保持される。そのために、ある年の土壤水分量はその年の降水量のみではなく、前年の降水量の影響も大きく受ける(Sugimoto et al., 2003)。年輪 $\delta^{13}\text{C}$ から推定した過去の土壤水分量の年々変動はこの降水量との1年のタイムラグをよく表現しており、このことから、年輪 $\delta^{13}\text{C}$ から推定した過去の土壤水分量の変動の年々変動（短周期の変動）は妥当であると考えられる。

2本のカラマツ個体の年輪から推定した過去の土壤水分量の年々変動は夏の生長期間の降水量の変動とよく一致した。しかしながら、長周期の変動に関しては問題点が存在している。年輪 $\delta^{13}\text{C}$ から推定した過去の土壤水分量は1960年頃から増加し始め、1975年以降はそれ以前と比較して、大きな土壤水分量を示す(図2)。しかしながら、降水量は1975年以降よりも以前の方が多いう年が多い。この年輪 $\delta^{13}\text{C}$ から推定した過去の土壤水分量と観測降水量との長周期変動の矛盾に関しては今後検討が必要である。

1960年から1970年にかけてヤクーツクの夏季後半(8月)の融解深の深度が増加していたことが Yang et al., 2002 により報告されている。融解深の変化と土壤水分量の関係は明らかではないが、両者がお互いに影響し合っていることは明らかであり、今後の検討課題である。また、本報告の過去の土壤水分量推定値は、現在のところカラマツ2個体を用いた暫定的な推定値である。樹木個体の年輪同位体解析では多くの場合樹木4個体を使用されることが多い。年輪幅のデータに比べると $\delta^{13}\text{C}$ の個体間のばらつきは比較的小さいと言われているが、長周期変動の不一致に関して個体間のばらつきによる誤差の影響を除いて検討する必要がある。

東シベリアタイガ林の過去の水分環境の復元は、本サイトの水循環の解明に重要であるだけでなく、水分環境によって主に規定されていると考えられる炭素循環の解明にも重要な知見を与えてくれると考えられる。現段階で問題点として残る長い周期の変動傾向も含めて土壤水分の復元の精度を高め、モデル班 G2c モデルチームの計算結果の検証データとする。

## 引用文献

- Barber, V. A., Juday, G. P., and Finney, B. P., 2000. Reduced growth of Alaskan white spruce in the twentieth century from temperature-induced drought stress. *Nature* **405**, 668-673.
- Bonan, G. B., Pollard, D., and Thompson, S. L., 1992. Effect of boreal forest vegetation on global climate. *Nature* **359**, 716-718.
- Briffa, K. R., Schweingruber, F. H., Jones, P. D., Osborn, T. J., Shiyatov, S. G., and Vaganov, E. A., 1998. Reduced sensitivity of recent tree-growth to temperature at high northern latitudes. *Nature* **391**, 678-682.
- Kagawa, A., Naito, D., Sugimoto, A., and Maximov, T. C., 2003. Effects of spatial and temporal variability in soil moisture on widths and delta C-13 values of eastern Siberian tree rings. *Journal of Geophysical Research-Atmospheres* **108**, 4500, doi:10.1029/2002JD003019.

- Kagawa, A., Sugimoto, A., and Maximov, T. C., 2006. Seasonal course of translocation, storage and remobilization of C-13 pulse-labeled photoassimilate in naturally growing *Larix gmelinii* saplings. *New Phytologist* **171**, 793-804.
- Lindroth, A., Grelle, A., and Moren, A. S., 1998. Long-term measurements of boreal forest carbon balance reveal large temperature sensitivity. *Global Change Biology* **4**, 443-450.
- McCarroll, D. and Loader, N. J., 2004. Stable isotopes in tree rings. *Quaternary Science Reviews* **23**, 771-801
- Sugimoto, A., Naito, D., Yanagisawa, N., Ichiyanagi, K., Kurita, N., Kubota, J., Kotake, T., Ohata, T., Maximov, T. C., and Fedorov, A. N., 2003. Characteristics of soil moisture in permafrost observed in East Siberian taiga with stable isotopes of water. *Hydrological Processes* **17**, 1073-1092.
- Sugimoto, A., Yanagisawa, N., Naito, D., Fujita, N., and Maximov, T. C., 2002. Importance of permafrost as a source of water for plants in east Siberian taiga. *Ecological Research* **17**, 493-503.
- Ohta, T., Hiyama, T., Tanaka, H., Kuwada, T., Maximov, T.C., Ohata, T. and Fukushima, Y. 2001. Seasonal variation in the energy and water exchanges above and below larch forest in eastern Siberia. *Hydrological Processes* **15**, 1459-1476.
- Ohta, T., Maximov, T.C., Dolman, A.J., Nakai, T., van der Molen, M.K., Kononov, A.V., Maximov, A.P., Hiyama, T., Iijima, Y., Moors, E.J., Tanaka, H., Toba, T. and Yabuki, H. (2008): Interannual variation of water balance and summer evapotranspiration in an eastern Siberian larch forest over a 7-year period (1998-2006). *Agricultural and Forest Meteorology* **148**, 1941-1953.
- Valentini, R., Matteucci, G., Dolman, A. J., Schulze, E. D., Rebmann, C., Moors, E. J., Granier, A., Gross, P., Jensen, N. O., Pilegaard, K., Lindroth, A., Grelle, A., Bernhofer, C., Grunwald, T., Aubinet, M., Ceulemans, R., Kowalski, A. S., Vesala, T., Rannik, U., Berbigier, P., Loustau, D., Guomundsson, J., Thorgeirsson, H., Ibrom, A., Morgenstern, K., Clement, R., Moncrieff, J., Montagnani, L., Minerbi, S., and Jarvis, P. G., 2000. Respiration as the main determinant of carbon balance in European forests. *Nature* **404**, 861-865.
- Yang, D. Q., Kane, D. L., Hinzman, L. D., Zhang, X. B., Zhang, T. J., and Ye, H. C., 2002. Siberian Lena River hydrologic regime and recent change. *Journal of Geophysical Research-Atmospheres* **107**, 4694, doi:10.1029/2002JD002542.

## G2b（素過程観測チーム）活動要約

檜山 哲哉

人間文化研究機構 総合地球環境学研究所

### 1. 当初の目的

G2b チームは、現在の東シベリアにおける水・炭素循環過程を、主に現地観測によって明らかにすることを目的としている。その内容は、①東シベリア永久凍土帯に生育するカラマツ林の、気象・水文要素に対する応答特性の把握、特に乾燥ストレスのみならず過湿ストレスに対するカラマツ林の応答特性の把握、②雪面熱収支と水収支、特に昇華蒸発量の定量把握、③凍土帯の地下水動態の把握と河川流出への寄与の把握、の3点である。

### 2. 研究の進行状況（研究概要）

研究目的に向けた今年度行った研究概要を以下に記す。

上記①については、GAME-Siberia 時代にヤクーツク近傍カラマツ林に設置したフラックス観測タワーを用いて、約12年間にわたる光合成・蒸発散を介した大気-植生間の水・炭素交換過程（およびカラマツ林の気象・水文要素に対する応答特性）に関する基礎データが取得され続けている。また本プロジェクトで新たに設置したウスティマヤ地域エレギーのフラックス観測タワーを用いて、ヤクーツクと同様の基礎データが取得開始された。エレギーはヤクーツクに比べて年降水量が3割程度多く、両地点での大気-植生間の水・炭素交換過程に関わるデータを比較することで、①の目的に向けた研究が遂行できる。2010年の生育期におけるヤクーツクとエレギーでの顕熱フラックスや潜熱フラックスの比較が、小谷らによって行われた。

上記②は、東シベリア域の水循環過程に関わる研究において、手薄な部分であった。今回、2010年融雪期における詳細な観測が、兒玉らによって行われた。

上記③については、今年度からロシア科学アカデミー・永久凍土研究所と総合地球環境学研究所との間で共同研究に関わる覚書等を締結し、東シベリア永久凍土帯での地下水動態に関わる本格的な共同研究を開始した。檜山らによって凍土上地下水と凍土内地下水が混合した湧水を夏季に採取され、フロン類などの人為起源物質をトレーサーとし、その年代を推定した。その結果40年から数年前に涵養された降水が（地下水を経て）湧水として地表に現れていることが明らかになった。

### 3. 今後の課題と展望

上記①については、今後、ヤクーツクとエレギーでの基礎データの比較が進むことで、東シベリア域における水・炭素循環過程の新たな描像が成果として出されることが期待できる。乾燥ストレスのみならず過湿ストレスに対するカラマツ林の応答特性の把握が、今後の課題として残されている。

上記②については、アラスカ、カナダ、北欧など、他の北半球高緯度域での雪面熱収支・水収支の知見と比較しながら、基礎データとその解釈結果を公表していく必要がある。

上記③については、夏季のみならず冬季（凍土上地下水が凍結した時期）に湧水を採取し、凍土内地下水のみの年代推定を行う必要がある。そして今後も継続して地下水年代を推定していくことで、温暖化による地下氷融解の有無についての知見を提供することができる。またG2cチームと連携することで、河川流出への地下水の寄与について、観測的知見をまとめていく必要がある。

# 東シベリアタイガ林における群落スケールの水・炭素循環

小谷亜由美・太田岳史  
名古屋大学大学院 生命農学研究科

## 1 はじめに

ユーラシア高緯度地域の北方林帯は全球表面積の20%以上をしめ、全球の気候システムへの影響が大きいことから、この地域に分布する森林の環境応答の特性を理解する必要がある。なかでも東シベリアの森林は、短い夏季と年間200-300mmと少ない降水量の条件下での植物活動には凍土からの水供給が欠かせないと考えられており、連続永久凍土帯の分布する地域に特徴的な水循環を形成する。この地域での観測的研究は1990年代から今日に至るまで進められており、東シベリアの森林、とくにカラマツを主体とした森林における水・熱・炭素交換の特性が明らかにされてきた。たとえば春季の蒸発散の開始は、土壌融解がカラマツ根の分布深度に到達した時期に始まり、6月から7月にかけてピークとなる。潜熱の増加に伴い顕熱が減少し、カラマツ着葉期間の後半には再び増加する (Tanaka et al., 2000 ; Ohta et al., 2001 ; Dolman et al., 2004) 。これらの結果が得られたヤクーツクと同程度の気温環境であるが降水量の多い中央シベリアのカラマツ林でも同様の季節変化が観測されている (Nakai et al., 2008, Schulze et al., 1999) 一方で、レナ川源流部山岳地では林床植物の寄与が大きくカラマツ展葉前に潜熱の増大がみられる (Kubota et al., 2004) など、同じカラマツ林でも樹種構成や環境によって異なる動態を示す。また、レナ川流域内の現地気象観測点データと陸面モデルを用いた研究でもこの地域において、気象要素や熱・水循環の空間多様性がみられることが示されている (Park et al. 2008) 。

ヤクーツクは東シベリア森林地域のなかでも降水量がとくに少ない地域である一方で、降水量がヤクーツクより多い地域において、これまでに得られたような水・熱・炭素交換の特徴がみられるのかどうかをさらに調べることで、森林の空間多様性を明らかにすることが重要である。そこで本研究では、東シベリアの森林地域の観測点として、ヤクーツク/Spasskaya Padとウスチマヤ/Elgeeiサイトで実施する気象観測データを用いて、立地環境により森林の熱・水・炭素循環がどのように異なるかを明らかにすることを目的とする。

また、環境の異なる森林での熱・水・炭素収支についての群落スケールでの知見は、BEAMS (G1 佐々井), 2LM (G2c 山崎), CHANGE (G2c 朴) 等の陸域モデルの検証、改良に利用されることが期待される。とくに、凍土の凍結融解プロセスと植物の水利用を介した水循環についてのモデル化が必要である。さらに Spasskaya Pad と Elgeei を対象とした樹木成長と生育環境との関係を探求する樹木年輪解析 (G2a 杉本) との連携を図ることにより、この地域の森林の成立条件や今後おこりうる環境変化への森林の応答予測などへの貢献をめざす。

## 2 研究対象地域と方法

### 2.1 研究対象地域

前章で述べたように、この地域では年間降水量が 200-300mm と少ないが、南部の山沿いから平地に向かって降水量が減少する空間分布をしている。そこで降水量の違いによる森林動態の違いをみることのできる2地点を選定した。まず降水量の少ない地域の森林としてレナ川 (流域面積 2,460,000km<sup>2</sup>) の中流域に位置するヤクーツク市街より北西 20km の森林地域にある Spasskaya Pad サイト (62° 15′ 18″N, 129° 14′ 29″E)、比較的降水量の多い地域の森林としてアルダン川 (レナ川の支流) 流域のウスチマヤ南西 60km の Elgeei サイト (60° 00′ 56″N, 133° 49′ 28″E) を比較対象地域とする。いずれも平坦地の森林であるが、周辺の地形がやや異なる。Spasskaya Pad はレナ川本流の左岸の河川低地を前面にもつ段丘上に立地し河川から 15km (低地と段丘の境界からは約 5km) の距離にある。Elgeei はレナ川流域南部の山岳地域に近く、アルダン川左岸の約 1.5km

と河川にして森林が存在する。1986-2004年における平均年降水量はそれぞれ230mm, 290mm, 平均気温は-8.7°C, -8.8°Cである (Suzuki et al., 2007)。サハ (ヤクーチア) 共和国森林局での聞き取りによると, ウスチマヤ周辺は成長量の大きい森林地域であり, 今後の林業計画の対象地のひとつであるが, 現在はほとんど利用されていない。

## 2.2 方法

### 2.2.1 Elgeei (EG) サイト

2008年の夏季にサイトを選定し, 2009年7-8月に観測タワーの建設および観測機器の設置を行い, 測定を開始した。観測内容を表1に示す。土壌呼吸データは2時間間隔の測定値を記録し, その他の項目は30分平均値を記録する。熱・水蒸気 (蒸発散)・二酸化炭素フラックスは渦相関法を用いて, 土壌呼吸フラックスはチャンバー法を用いて測定する。観測システムの動力が太陽光発電によることと現地へのアクセスの可否から4-9月の6ヶ月間を観測実施期間とする。また, 2008年10月にはタワー立地点を中心とした50×50mの調査プロットを設定し, 毎木調査 (樹種の同定, 樹高, 胸高周囲長, 樹冠位置の測定) を行った。2010年7月には土壌サンプルを採取し透水性試験を行った。

表1 Elgeei サイトにおける観測内容

測定項目	測定高度/ 深度(m)	測定項目	測定高度/ 深度(m)	測定項目	測定高度/深度(m)
熱・水蒸気・二酸化炭素フラックス	35.3	風速	34.5, 3.4	地温	-0.01, -0.1, -0.2, -0.4, -0.6, -0.8, -1.2, -2.0, -3.0, -4.0, -5.0
短波放射 (日射)	33.6, 2.7	気温	32.9, 24.5, 14, 2.6	土壌水分	-0.1, -0.2, -0.4, -0.6, -0.8, -1.2
長波放射	33.6, 2.7	相対湿度	32.9, 24.5, 14, 2.6	地中熱流量	-0.05
光量子フラックス	33.6, 2.7	大気圧	1.5		
降水量	34.3	土壌呼吸	0		

### 2.2.2 Spasskaya Pad (SP) サイト

ヤクーツク市街より北西20kmの森林地域にある Spasskaya Pad (北方生物問題研究所/ロシア科学アカデミー所有の研究林) にて, 1998年より継続して気象, 水文, 植物生態学の観測が実施されている (Ohta et al., 2001, Ohta et al., 2008 など)。本研究では, この地域の主要構成樹種である落葉針葉樹の *Larix cajanderi* を中心としたカラマツサイトを対象として, 主に Elgeei サイトと同様の項目 (表1) を使用する。本サイトでは1999年に毎木調査が行われているが, 2010年9月に同様の調査を行った。

## 3 結果

### 3.1 Elgeei での水・炭素循環

3.1.1 に EG サイトで行った毎木調査の結果による森林の特徴を, 3.1.2 と 3.1.3 に EG 観測タワーで測定した2010年4月-9月の気象データとフラックスデータの季節変化を (SP サイトでの過去の測定値と比較しながら) 報告する。

#### 3.1.1 森林の特徴

観測タワー周辺の50×50mの調査プロットで得られた樹種はカラマツ (273本), カンバ (142本), ヤナギ (222本), アカマツ (14本) であり, 樹木密度は2604本 ha<sup>-1</sup>, 胸高断面積合計は35.3m<sup>2</sup> ha<sup>-1</sup> (いずれも樹高1m以上を対象), 高層木群の樹冠高度は25m前後であった。図1に示したこれらの樹高と胸高直径の分布のように, カラマツ (*Larix cajanderi* Mayl) を中心に, カンバ (*Betula pendula* Roth), アカマツ (*Pinus sylvestris*)

L.)が主な上/中層構成樹種で、下層はヤナギ(*Salix bebbiana* Sarg.), オオタカネバラ(*Rosa acicularis* Lindl.)などから成る森林である。林床には落枝や落葉が堆積し、リター層を形成する。

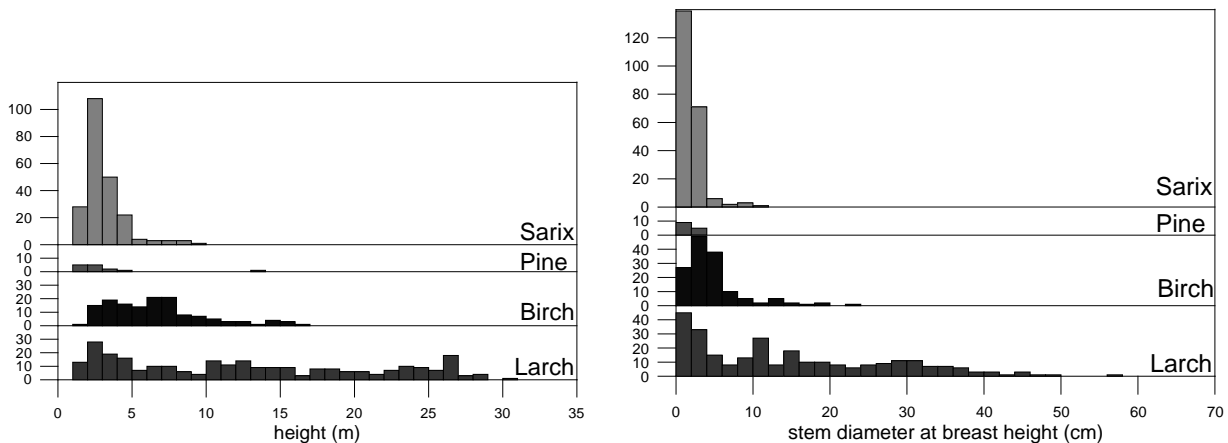


図1 EGサイトにおける樹種別の樹高(左)と胸高直径(右)の個体数  
上よりヤナギ(sarix), アカマツ(pine), カンバ(birch), カラマツ(larch)を示す。  
(50×50mのプロット内で観測されたものである。)

### 3.1.2 気象, 地中環境の季節変化

2010年測定期間のEGにおける日射, 気温, 大気飽差, 風速の日平均値の季節変化をSPでの2002-2007年の平均値と標準偏差とあわせて図2に示す。EGでは風速がやや小さい傾向があるほかはSPでの平年値と比較して大きな違いはみられないが, 日射と大気飽差の値はSPの6年間の標準偏差の範囲を超えて変動している。つぎに, EGにおける同期間の降水量と土壌水分の季節変化を図3に示す。土壌水分は各深度で測定したものを深度ごとに加重積算して, 表層0-30cmと0-120cmに含まれる液状水の量として示し, 矢印で各深度が融解(地温が0度を超える)した時期を表す。夏季前半には表層土壌の融解と降水により土壌水分が増加して7月以降は漸減している。土壌融解すなわち活動層の形成は表層1cmにおいて4月末, 10cmにて5月中旬に始まり, 120cmまで達するのは8月中旬であった。なお, 次の深度である200cm以下では9月末でも凍結していた。

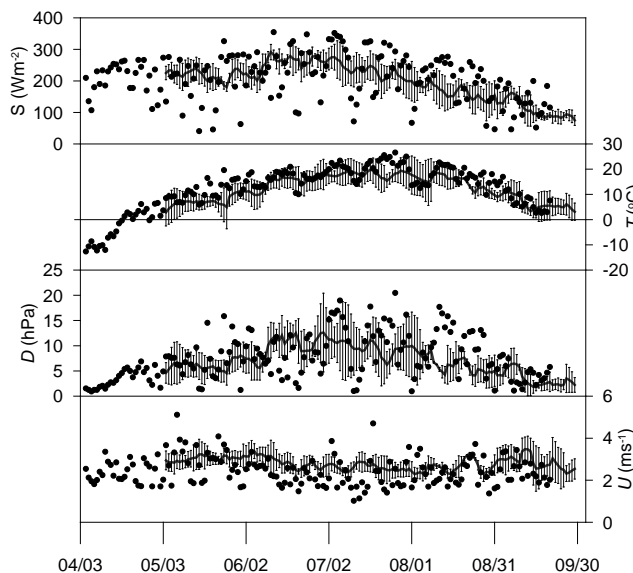


図2 気象要素の季節変化

上より, 日射, 気温, 大気飽差, 風速の日平均値を示す。黒点はEGでの2010年測定, 実線はSPでの2002-2007年測定の平均値, エラーバーはその標準偏差を表す。

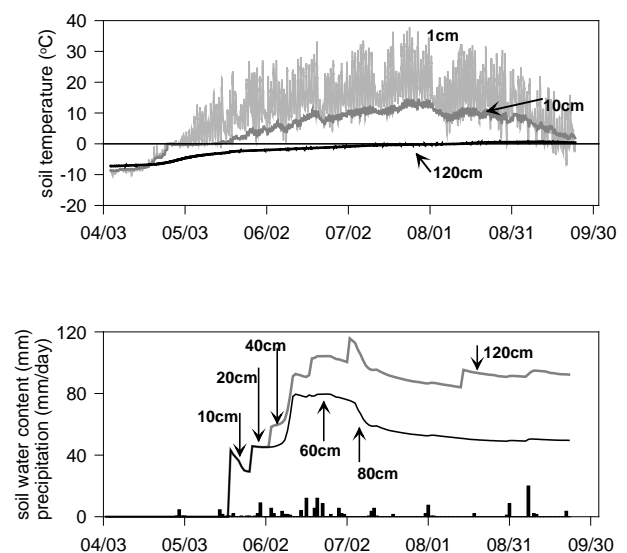


図3 地中環境と降水量の季節変化

上図に地中1, 10, 120cmの地温の30分値を示す。  
下図に0-30cm(黒線)と0-120cm(灰線)の土壌水分と日降水量(棒グラフ)を示す。

### 3.1.3 蒸発散, 二酸化炭素フラックスの時間変化

森林群落と大気間での熱収支項目と二酸化炭素のフラックス（正味生態系交換量：NEE）の季節変化を SP での 2004-2007 年の平均値と標準偏差とあわせて図 4 に示す。それぞれの日平均値を算出するために、欠測データは補間してある。EG の正味放射量は SP の平均値および標準偏差の幅よりも主に 6-8 月において大きい、顕熱輸送量はあまり変わらない。過剰の熱は、潜熱輸送すなわち蒸発散に消費される。NEE は全期間を通して、EG で SP よりも大きい。

NEE を生態系呼吸量 (ER) と生態系総生産量 (光合成による吸収量：GPP) とに分離した結果を図 5 に示す。GPP について 2010 年の EG での測定値は SP の過去 4 年の変動のうち GPP の大きな年に匹敵する一方で、2010 年の EG の ER は SP での変動幅に入っている。この結果として、ER と GPP の差である NEE については、EG が SP を上回る吸収量となっている。林床で計測した土壌呼吸については、2010 年 5-9 月の積算値が EG では  $8.56 \text{ t C ha}^{-1}$ 、SP では  $4.12 \text{ t C ha}^{-1}$  (2004-2009 年平均では  $3.9 \text{ t C ha}^{-1}$ ) と 2 倍の二酸化炭素放出を計測した。

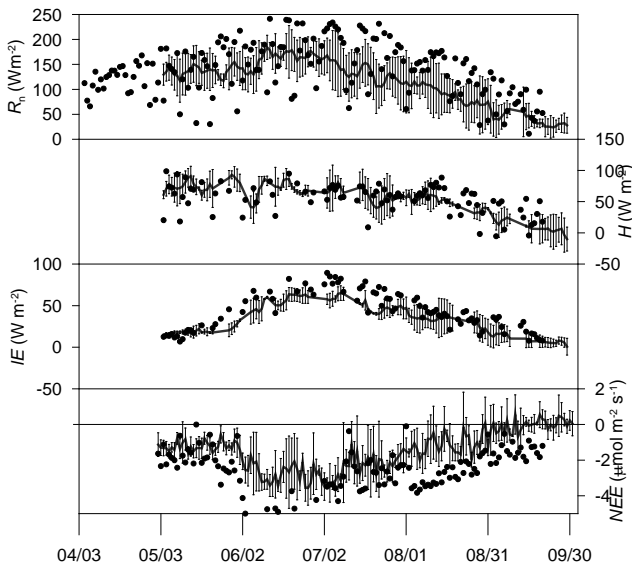


図 4 熱収支項目と二酸化炭素吸収量の季節変化  
上より、正味放射( $R_n$ )、顕熱( $H$ )、潜熱( $1E$ )、生態系正味  $\text{CO}_2$  交換量(NEE：負値が吸収)の日平均値を示す。黒点は EG での 2010 年測定、実線は SP での 2004-2007 年測定の平均値、エラーバーは標準偏差を表す。

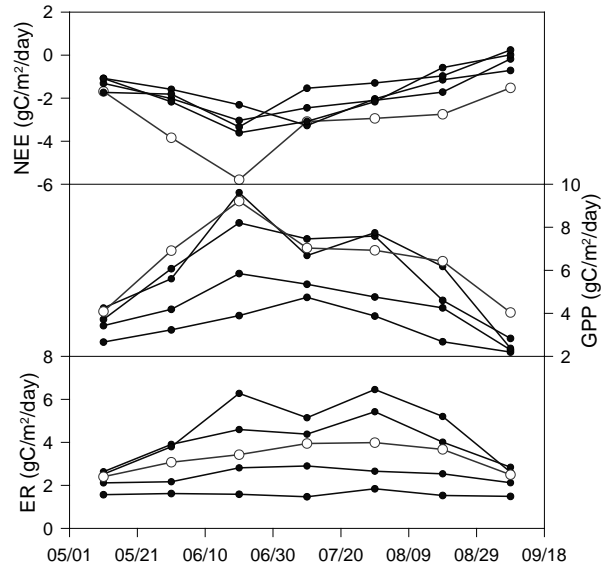


図 5 生態系正味交換量(NEE)、総生産量(GPP)、生態系呼吸量(ER)の季節変化。日積算量の 20 日平均を示す。白丸が EG、黒丸が 2004-2007 の SP での測定値を示す。

## 3.2 Spasskaya Pad での水・炭素循環

Spasskaya Pad での観測研究は 10 年以上におよび、1 章で述べたように様々な知見が得られているが、長期間の観測データを利用した年スケール以上の解析が今後の課題である。ここでは、森林群落での蒸発散 (3.2.1) と二酸化炭素フラックス (3.2.2) についての結果を報告する。また、この 10 年間でとくに 2005 年頃からみられる森林状態の変化についても最後に記述する (3.2.3)。

### 3.2.1 異なる時間スケールにおける蒸発散とその支配要因の変動特性

1998-2007 年の観測データに対して周波数解析を行い、森林からの蒸発散と気象/水文要素の時間変動特性を調べた。蒸発散や日射、顕熱フラックスは日周期の変動が卓越し、気温や大気飽差は数日-数ヶ月周期、土壌水分は年周期の変動が顕著であった (図 6)。蒸発散とその支配要因としての気象/水文要素との共変動性 (単

相関) についても同様の解析を行ったところ、蒸発散と日射とは日周期から年周期まですべての時間スケールで高い相関を示した一方で、気温や大気飽差とは数日周期以上のスケールで、土壌水分とは年周期以上のスケールで相関がみられた。さらに Jarvis 型コンダクタンスモデル (Jarvis, 1976) を用いて、群落コンダクタンスと環境要因との共変動性を調べたところ、大気飽差は数日-数ヶ月周期で、土壌水分は年周期以上のスケールで群落コンダクタンスの変動と大きな相関をもつことがわかった (Yoshida et al., 2010)。

### 3.2.2 二酸化炭素フラックスの年変動と環境要因の関係

森林群落での生態系正味吸収量の年変動に対する支配要因を明らかにするため、2003-2008 年の SP での夏季 (6-8 月) 平均値の変動を調べた。2004 から 2007 年にかけては、土壌水分の増加と同時に生態系総生産量 GPP が増加しているが、2008, 9 年も引き続き土壌水分が増加しているのに関わらず、GPP は低下した。2008, 9 年には大気飽差が大きく、植物の気孔開度が抑制されたと考えられる (図7)。

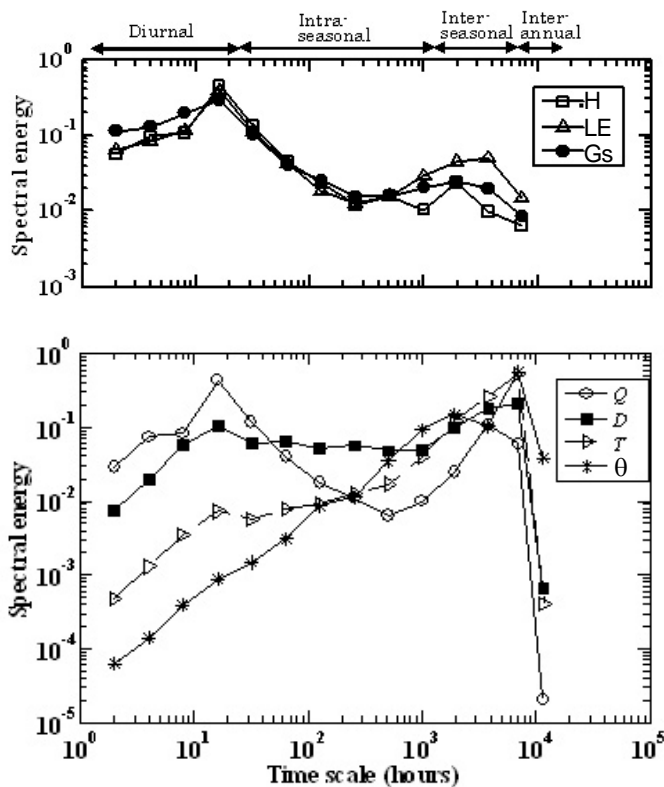


図6 蒸発散や気象要素のパワースペクトル分布  
上図に顕熱 (H ; □), 潜熱 (蒸発散, LE ; △), 群落コンダクタンス (Gs ; ●), 下図に光合成有効放射量 (Q ; ○), 大気飽差 (D ; ■), 気温 (T ; △), 土壌水分 (θ ; \*) を示す。相当する時間スケールを図の上部に記す。

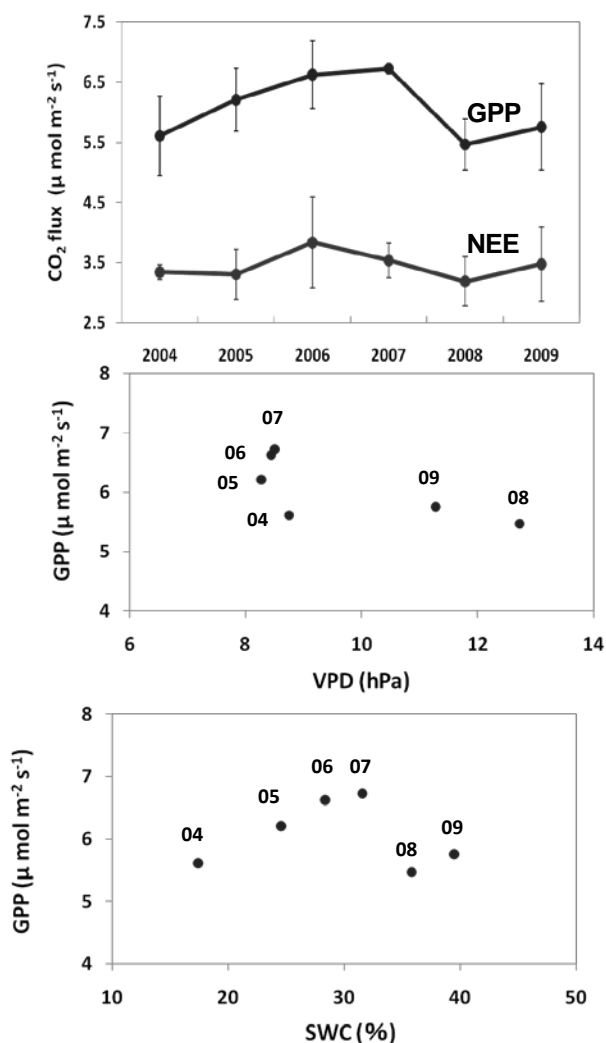


図7 (上) GPP と NEE の年変化  
(下) GPP と大気飽差 (VPD), 土壌水分 (SWC) との関係。各点は各年の 6-8 月平均値を示す。



### 3.2.3 森林生態系の変化

観測地点の周辺の森林では、2007年夏季より列状にカラマツが枯死する現象が起こっている。2008-2010年にタワー周辺で枯死木の数を計上したところ、2008年には10m以上のカラマツ169本中15本の枯死木がみつき、2009年には2本増加、2010年には変化なしという結果であった。このうち13本が15m以上（うち5本が20m以上）の比較的高木である。また、かつてはコケモモが卓越していた林床植生に草本性植物が増加してきていることが確認されており、下層植生が変化している可能性がある。

## 4 考察

### 4.1 降水環境の異なる森林の比較研究についての課題

2地点の森林群落で観測された気象要素および熱・水・炭素フラックスの比較をこれまでにを行ったが、今後はこれらのフラックスの違いとその原因を明らかにする。このために注目する点として、まず樹木が利用可能な水供給のプロセスすなわち土壌水分の動態があげられる。春季の融雪、凍土融解によって、植物が利用可能な水が供給されることにより、樹木は蒸散と光合成を開始する。夏季の生長期中に進行する凍土融解と降水パターンが、土壌水分の変化をとおして植物活動に影響すると考えられるので、これらの季節変化に着目して、2サイトの水環境を比較する。

一方で、光合成量や蒸発散量の違いの原因として気象環境、水分環境の違いのほかにも、蒸散、光合成、生態系呼吸の環境応答を表すモデルのパラメータが異なることが考えられる。蒸発散（蒸散）については、ペンマン・モンティスの式やJarvisコンダクタンスモデル、光合成についてはFarquhar(1980)、Cowan(1977)などのモデルを検討する。タワー観測に加えて個葉の蒸散、光合成を測定することで、個葉スケールと群落スケールの両方での環境応答を比較する（SPサイトでは既往研究がある：伊藤, 2008；Matsumoto et al. 2008など）。

また、2地点の森林群落の葉面積指数などのデータを揃える必要がある。現時点で得られている2サイトでの毎木調査データから、樹高、立木密度、断面積などの点でEGの林分のほうが樹木成長の大きいことが示唆されるが、サイトでの葉面積指数からも2サイトの違いを評価する。衛星データで得られる植生指数も植物量の違いを表すものとして検討する。また、1章で述べたようにこの2サイトでは樹木年輪の調査も行われているので（G2a 杉本、鄭）、年輪データからも成長量の違いを得ることができる。

### 4.2 長期データを用いた水・炭素循環の長期変動についての課題

Spasskaya Padでの長期データを用いて、水循環とくに蒸発散に関する長期変動についてはOhta et al. (2008)やYoshida et al. (2010)などの研究が進められ、日一季節内変動については大気飽差や日射など大気条件の影響が大きく、より長期の変動については土壌水分の影響が大きくなってきた。しかし、土壌水分の影響については、水分量の増加に伴い蒸発散も増加する期間と減少する期間があり（Yoshida et al., 2010）、後者については3.2.3で述べたような植物の変化も合わせて、ひきつづき近年の観測データを用いた研究が必要である。

蒸発散の研究に比べて、森林群落と大気間での二酸化炭素交換に関する研究はDolman et al. (2004)などがみられるが、まだ十分とはいえない。3.2.2節で述べたような炭素収支項目の年/季節変動の特性や環境応答についての研究を進める。

## 5 おわりに

環境とくに降水量の異なる2サイトでの群落スケールの観測をもとに、東シベリア北方林における水・炭素循環の特徴を明らかにすることが本研究の目的である。このため、①降水量の増加する地域の森林（Elgecii）でのタワー観測を新たに開始し、降水量のより少ない地域の森林（Spasskaya Pad）と比較を行うことと、②

Spasskaya pad での 10 年以上の長期データを利用した水・炭素循環の長期変動とその影響する要因を解明することの主に 2 つの課題について研究を行っている。

①について、2010 年の Elgeei における観測結果は、過去の Spasskaya Pad と比較して日ベースでの蒸発散で最大 1.5 倍、二酸化炭素吸収で最大 2 倍に達することがわかった。タワー周辺林分での樹木個体の大きさが Elgeei でやや大きいこと、土壌水分量も大きいことなど、南部の森林において水・炭素循環がより活発であることが考えられ詳細の解析をすすめる。

②について、過去約 10 年の観測データが蓄積されている Spasskaya Pad では、日スケールから年スケール以上までの蒸発散の変動特性や炭素収支項目の年変動に影響する要因について明らかになりつつある。今後はとくに炭素収支の解析を中心に、水循環と炭素循環を合わせて対象地域の森林の環境応答について解明が必要である。

## 6 参考文献

- 伊藤珠樹 (2008): 北方林と温帯林における気孔コンダクタンスの環境応答特性. 名古屋大学生命農学研究科修士論文, 122p.
- Cowan, R. (1977): Stomatal behaviour and environment. *Advanced Botany Research*, **4**, 117-228.
- Dolman, A. J., T. C., Maximov, E. J. Moors, A. P. Maximov, J. A. Elbers, A. V. Kononov, M. J. Waterloo, and M. K. van der Molen (2004): Net ecosystem exchange of carbon dioxide and water of far eastern Siberian Larch (*Larix cajanderii*) on permafrost. *Biogeosciences*, **1**, 133-146.
- Farquhar, G.D., S. von Caemmerer and J.A. Berry (1980): A biochemical model of photosynthetic CO<sub>2</sub> assimilation in leaves of C<sub>3</sub> species. *Planta*, **149**, 78-90.
- Jarvis, P. G (1976): The interpretation of the variations in leaf water potential and stomatal conductance found in canopies in the field. Philosophical transactions of the Royal Society of London. Ser. B. *Biological sciences*, **273**, 593-610.
- Kubota, J., K. Suzuki, Y. Yamazaki, T. Ohata, and V. Vuglinsky (2004): Water and Energy Budget in the Southern Mountainous Region of Eastern Siberia. In Proceedings of the 6th International Study Conference on GEWEX in Asia and GAME, Matsumoto, J., Higuchi, A., Nakamura, K. Yasunari, T. eds. GAME International Project Office, Nagoya, Japan, Publ. No. 11; CD-ROM.
- Matsumoto, K., T. Ohta, T. Nakai, T. Kuwada, K. Daikoku, S. Iida, H. Yabuki, A. V. Kononov, M. K. van der Molen, Y. Kodama, T. C. Maximov, A. J. Dolman, S. Hattori (2008): Response of surface conductance to forest environments in the far east. *Agricultural and Forest Meteorology*, **148**, 1926-1940.
- Nakai, Y., Y. Matsuura, T. Kajimoto, A. P. Abaimov, S. Yamamoto, and O. A. Zyryanov (2008): Eddy covariance CO<sub>2</sub> flux above a Gmelin larch forest on continuous permafrost in Central Siberia during a growing season. *Theoretical and Applied Climatology*, **93**, 133-147.
- Ohta, T., T. Hiyama, H. Tanaka, T. Kuwada, T. C. Maximov, T. Ohata, and Y. Fukushima (2001): Seasonal variation in the energy and water exchanges above and below a larch forest in eastern Siberia. *Hydrological Processes*, **15**, 1459-1476.
- Ohta, T., T. C., Maximov, A. J. Dolman, T. Nakai, M. K. van der Molen, A. V. Kononov, A. P. Maximov, T. Hiyama, Y. Iijima, E. J. Moors, H. Tanaka, T. Toba, and H. Yabuki (2008): Interannual variation of water balance and summer evapotranspiration in an eastern Siberian larch forest over a 7-year period (1998-2006). *Agricultural and Forest Meteorology*, **148**, 1941-1953.
- Park, H., T. Yakazaki, K. Yamamoto, and T. Ohta (2008): Tempo-spatial characteristics of energy budget and evapotranspiration in the eastern Siberia. *Agricultural and Forest Meteorology*, **148**, 1990-2005.

- Schulze, E. D., J. Lloyd, F. M. Kelliher, C. Wirth, C. Rebmann, B. Luhker, M. Mund, A. Knohl, I. M. Milyukova, W. Schulze, W. Ziegler, A. B. Varlagin, A. F. Sogachev, R. Valentini, T. Tchebakova, and N. N. Vygodskaya (1999): Productivity of forests in the Europsiberian boreal region and their potential to act as a carbon sink – a synthesis. *Global Change Biology*, **5**, 703-722.
- Suzuki, R., V. N. Razuvaev, O. N. Bulygina, and T. Ohata (2007): Baseline Meteorological Data in Siberia Version 4.1, Institute of Observational Research for Global Change, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, Yokosuka, Japan.
- Tanaka, H., T. Ohta, T. Hiyama and T. C. Maximov (2000) Seasonal variation of photosynthesis and transpiration properties of a boreal deciduous forest. Analysis using a single layer canopy model. *Journal of the Japanese Forestry Society*, **82**, 259-267.
- Yoshida, M., T. Ohta, A. Kotani, and T. C. Maximov (2010): Environmental factors controlling forest evapotranspiration and surface conductance on a multi-temporal scale in growing seasons of a Siberian larch forest. *Journal of Hydrology*, **395**, 180-189.

# スパスカヤパッドでの 2010 年融雪水熱収支

兒玉裕二 北海道大学 低温科学研究所  
松田直也 名古屋大学大学院 生命農学研究科  
Roman Petorov Federal North-eastern University

## 1 はじめに

積雪の存在は地表面の熱収支を大きく変えるので、地球環境を考える上で重要な要素である。積雪のアルベドは他の地球上の物質と比べて大きく、最も大きな入力熱量である日射の影響を左右する。また、積雪はたくさんの空気を含むために断熱材としての効果が大きく、特に寒冷地においては積雪下の土壌などの温度に大きく影響を与える。

シベリアのヤクーツク周辺では 1996 年から始まった GAME シベリアプロジェクト以来熱・水収支の観測が行われているが、夏季の観測が主で、積雪の観測が行われていなかった。唯一、Hashimoto et al, (1998) が融雪期の観測を行ったがまだ公表されていない。シベリア南部のティンダでの観測では、昇華が大きいことが報告されている。しかしながら、融雪期の積雪からの蒸発量はあまり大きくないという報告もあり、場所による違いが大きいと考えられる。

最近、北極海の最小海氷面積が減少していることに伴って、陸域でも様々な変化が起こっている (Iijima et al. 2010)。特に凍土温度の上昇、活動層の湿潤化、北極海流入河川の流量の増加など、水循環の変化を示唆する現象が多く起こっている。それらの左右する要素の一つ、積雪期間の減少、つまり、積雪の始まりの遅れや消雪の早まりが多く報告されている。また、これらの減少は、夏季降水量の増加や活動層厚の増大、蒸発散の変化などと共に水循環に大きな影響を与えていると思われる。

そこで、この研究では、積雪期後半や融雪期の積雪の熱・水収支を観測することによって、①その特徴を明らかにし、②Hashimoto et al. が 1998 年に行った観測結果とひかして最近の変化傾向を明らかにし、③雪面や樹冠に積もった積雪からの昇華の特徴を明らかにすることを目的とする。

## 2 観測地

観測地はサハ共和国ヤクーツク市の北西約 20km のところにある、北方生物問題研究所の研究林(62°15'18"N, 129°37'08"E、海拔 220m)で行った。ここは東シベリアのレナ川の中流域に位置する。地形はほとんど平坦で、カラマツが支配樹種で、他にアカマツやカンバなどの林が点在する。ここは 1996 年 8 月から高さ 32m の森林境界層観測タワーを利用した観測が続けられている。タワー近くの 50mx50m プロット内のカラマツの平均樹高は 18m、立木密度は 840 ha<sup>-1</sup>。積雪は 9 月中旬から 5 月中旬まで存在する。

## 3 観測要素

タワー近くのカラマツ林内で、以下のマニュアル観測を 2010 年 3 月 10 日から 4 月 26 日まで行った。雪面低下量、積雪温度と密度の鉛直プロファイル、積雪水量。また、直径 24cm、深さ 4.5cm の蒸発パンに雪を入れて雪面に置き、その重量変化から、雪面からの蒸発量を求めた。さらに直径 23cm、厚さ 4.5cm の氷のブロックをタワーの 30m、20m、10m と地上 1.2m にぶら下げ、その重さ変化から昇華量を算定した。蒸発パンと氷ブロックの重量は 1 日 1~2 回測定した。森林境界層観測タワーでは各気象要素が自動的に観測されている。

## 4 結果

### 4.1 気象要素

観測期間中の気温、比湿、風速の推移を Fig.1 に示す。4月12日より最高気温がプラスとなり、4月17日より平均気温がプラスとなった (Fig.1A)。4月26日、4月27日、5月3日には降雪がありそれに伴って気温、比湿が下がっている。比湿は積雪期間の前半はほとんど2g/kg以下であったが、平均気温がプラスとなった4月17日から比湿が急激に増加している (Fig.1B)。風速は期間を通して小さく、1.5m/s以下であった (Fig.1C)。また、日射は4月25日頃までほとんど単調に増加したが、4月26-27日には降雪があり、日射が急激に減少した。5月3日にも降雪があり、5月5日には消雪となった。4月15日頃より反射が減少に転じ、それと共にアルベドが減少し始めた。アルベドは新雪と共に増大したが、それが融けると減じた (Fig.2A)。タワートップの32m高の下向き長波放射は単純増加していた (Fig.2B)。正味放射は3月13日頃よりプラスに転じ、4月10日頃まで小さな正の値で推移したが、4月12日頃より急激に増加した。しかしながら、新雪が積もると急激に減少した。このことからでも、積雪が地表面熱収支に大きな影響を与えることがわかる。

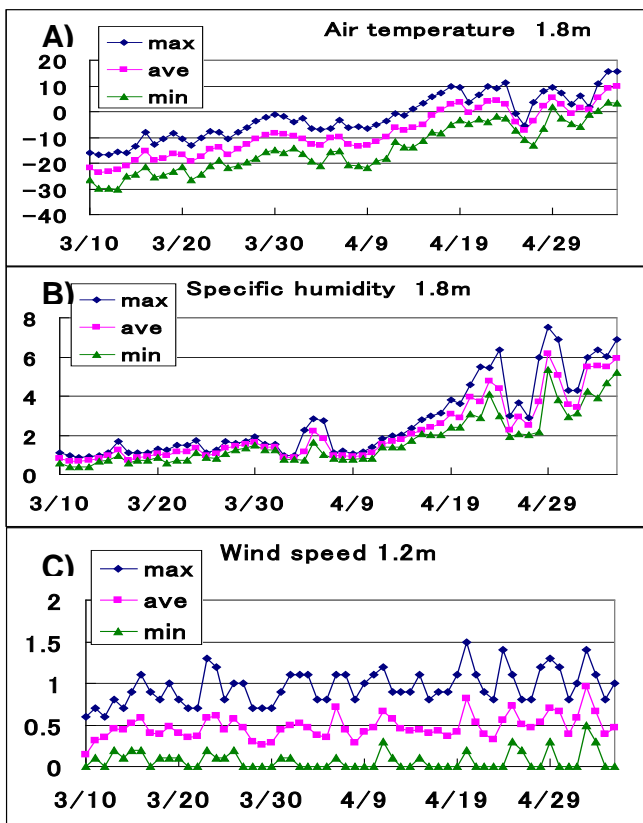


Fig. 1 気温、比湿、風速の変動

### 4.2 雪温の変動

Fig.3 に4月15日から5月5日までの0、5、10、15、20cmの雪温の推移を示す。70cmのセンサーは常に積雪の外にあり、日射に晒されていたので、気温よりも高い値となっている。3月下旬に日最高気温がほとんど0°Cとなったが、雪温は-10°C以下であり、4月10日ごろまであまり変わっていない。4月17日に初めて高さ20cmが0°Cとなり、4月19日には全層0°Cとなった。4月19日には20cmの温度が0°C以上となったので、積雪深は20cm未満であることがわかる。同じように4月20日には積雪深が15cm未満、4月24日には10cm未満であっ

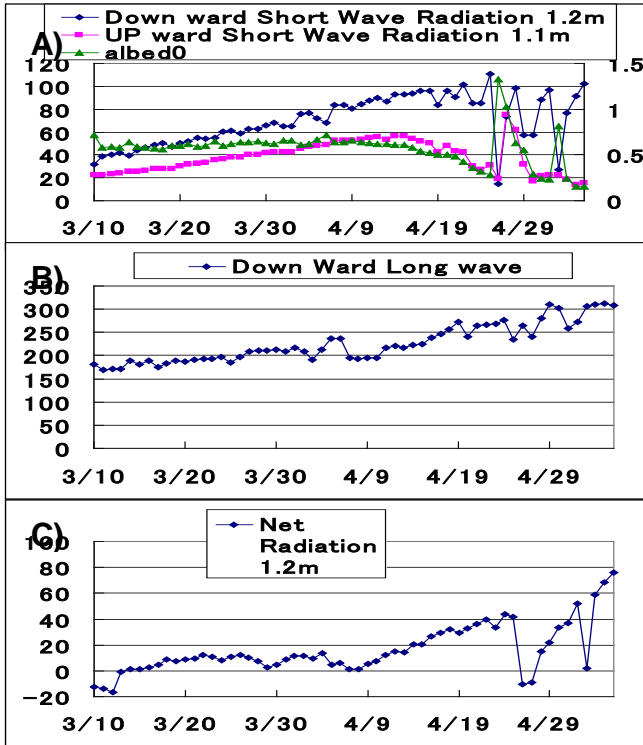


Fig.2 日射、反射、アルベード (A) 、大気放射 (B) 、正味放射 (C) の推移

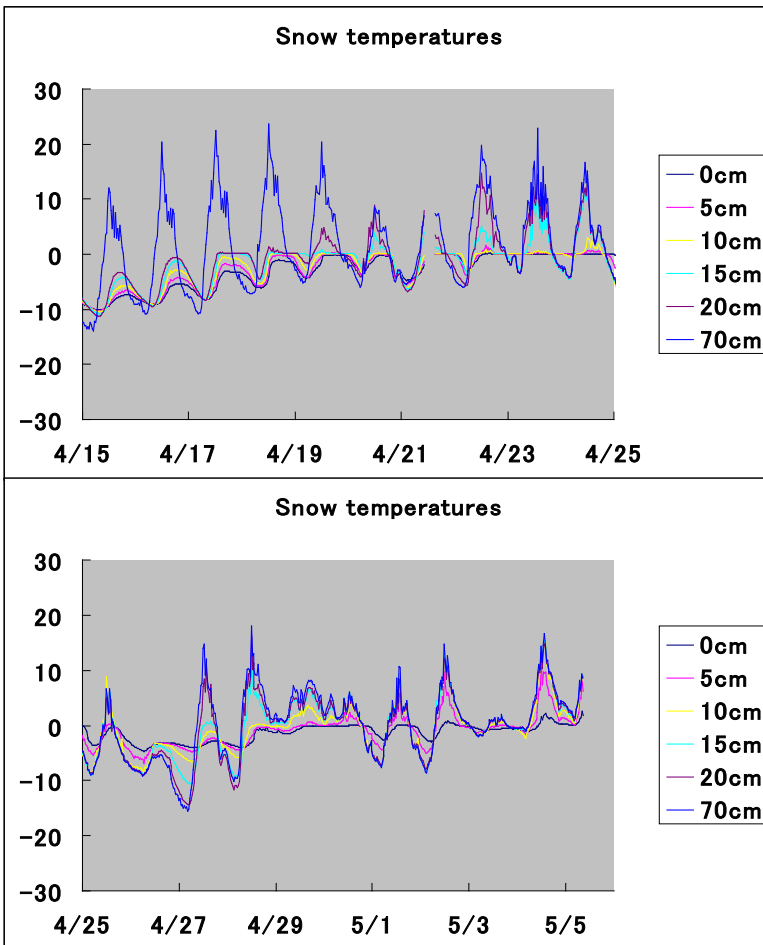


Fig.3 雪温の推移

た。4月26日には新雪が積もり、気温が低かったため全層が0°C未満となり、融雪が起こらなかったことがわかる。4月28日には積雪深が10cm未満となり、4月24日と同じになった。4月29日には積雪深が5cm未満となり、5月2日には全層プラスの温度となり、雪温を測っている場所では積雪がゼロになったことがわかる。

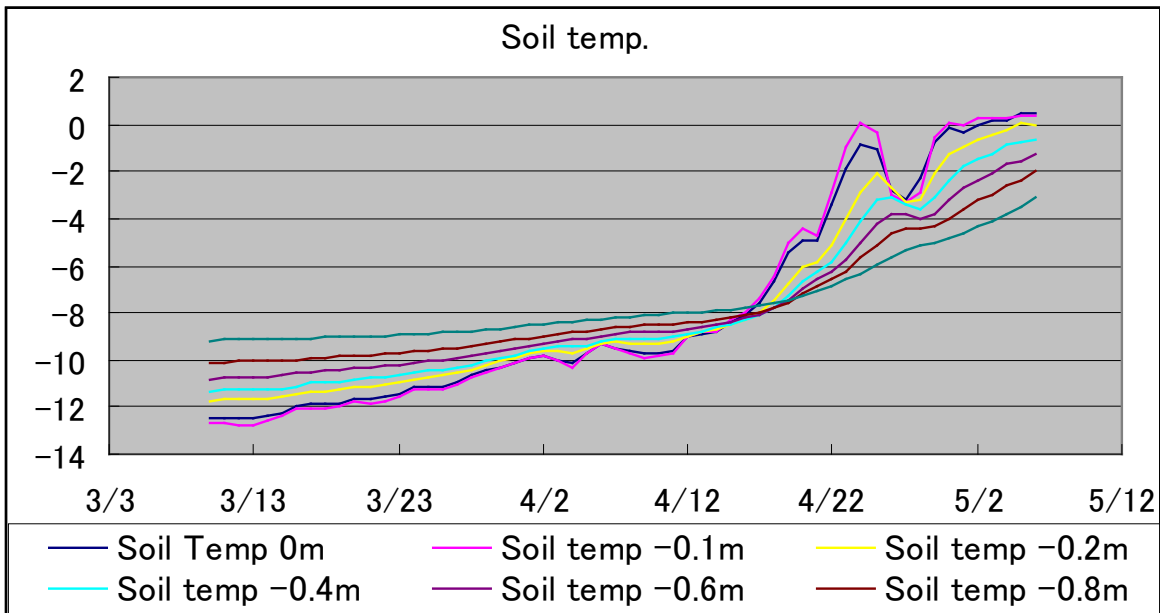


Fig. 4 地温の変動

#### 4.3 地温の変動

Fig. 4に地温の変動を示す。4月中旬ころまで地温はどの深さでも緩やかに上昇した。この時、地温は深いほど高い。4月17日前後に地温プロファイルは激変し、測定点が深いほど地温が低くなっている。この地温傾度の逆転は雪面での融雪が盛んになった日と一致しており、非常に興味深い。4月23日には10cm深度の地温がほとんど0°Cになっているが、積雪-地面境界の0cmの温度は0°C未満であった。これは10cm深度には融雪水が到達しているが、境界のセンサーには到達していないことを示しており、融解水が浸透する時に水みちが存在したことがうかがえる。

#### 4.4 積雪水量の変動

Fig. 5に積雪水量の変動を示す。観測開始から4月17日頃まではほとんど変化がなく、約45mmであった。4月17日頃から顕著に減少に転じ、融雪が始まったことがわかる。この観測は4月24日までしか行えなかった。Hashimoto et al.の1998年の観測によると4月17日には100mmの積雪があったので、2010年は非常に積雪水量が少なかったことがわかる。

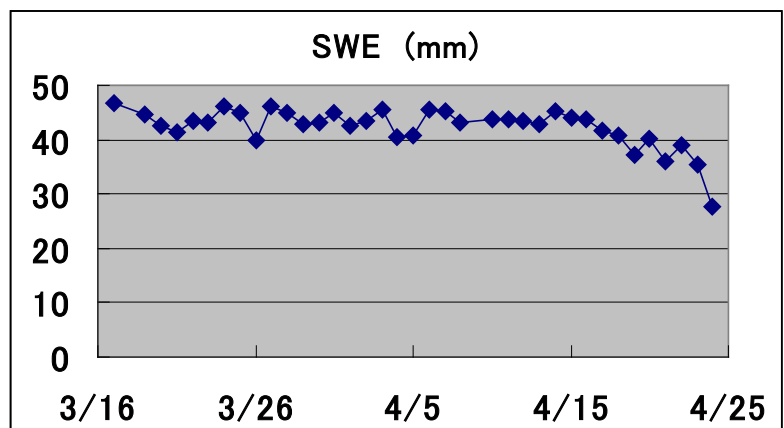


Fig. 5 積雪水量の推移

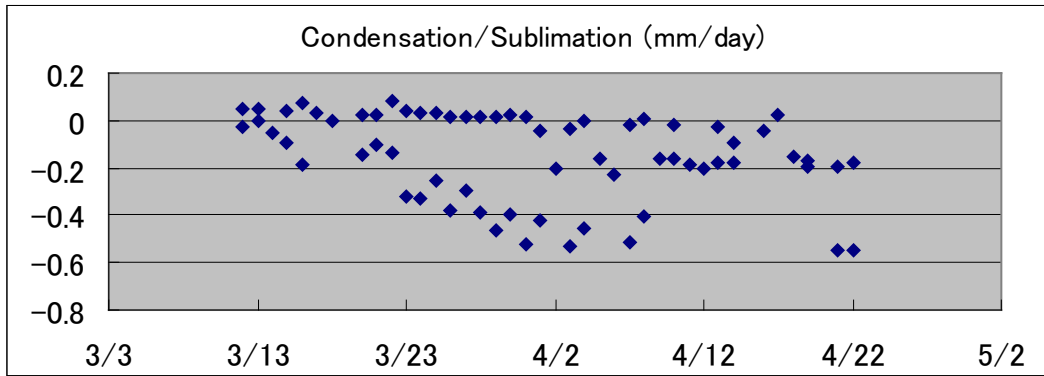


Fig. 6 カラマツ林内における雪面からの蒸発量

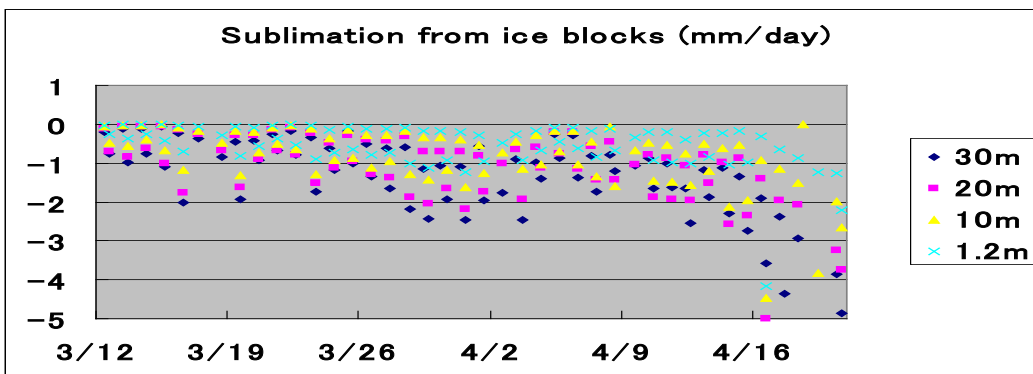


Fig. 7 タワーに取り付けた氷ブロックからの昇華。値は氷ブロックの単位表面積あたりの昇華量である。

#### 4.5 雪面と氷ブロックからの蒸発

Fig.6にカラマツ林内における雪面からの蒸発量の推移を示す。値は積雪の単位表面積あたりの昇華量であり、1日当たりに換算してある。ゼロに近い値あるいはプラスの値は夜間の値で、プラスの値は凝結が起きていることを示している。3月中旬から4月中旬にかけて蒸発量が徐々に大きくなっていることがわかる。Hashimoto et al.の報告によると17日間で6.4mmの蒸発がおこっていたので、1日当たりで約0.37mmの蒸発があったことになり、今回の測定と同じような値となっている。

樹冠に積もった積雪は、地面に積もった積雪と異なり、3次元的な蒸発を受けていると考えられる。これらは大気に戻っているため、降水遮断とみなされる。Fig.7にタワーに取り付けた氷ブロックからの蒸発を示す。3月中旬から4月中旬にかけて値が大きくなっている。4月中旬以降の大きな値は融雪量に加わっていることが考えられるので、単に蒸発のみとはみなすことが出来ない。夜間は小さな値を示しており、昼間は比較的大きな値になっているが、ほとんど場合、上に行くほど蒸発量が大きくなっている。この氷ブロックからの蒸発量の高度分布は樹冠に付着している雪からの蒸発の高度分布と同じ傾向であると考え、降雪遮断は樹冠上の気象状態だけでは推定できないことが示唆される。

### 5 今後の課題

これまでの解析から、地温傾度逆転や蒸発量の高度分布など興味深い結果が出てきているが、まだ解析途中である。これから水収支・熱収支の算定を行い、シベリアタイガ地域における融雪のダイナミクスを明らかにしたい。

#### 引用文献

Hashimoto, T., Ohta, T., Toba, T., Maximov, T.C., Kononov, A.V. Heat and water balance of the snowpack and permafrost during the snowmelt season in a larch forest in eastern Siberia (unpublished)



# 東シベリア ヤクーツク近郊の永久凍土帯に分布する

## 湧水の地下水年代

檜山 哲哉

浅井 和由

Alexander KOLESNIKOV

Leonid GAGARIN

Victor SHEPELEV

人間文化研究機構 総合地球環境学研究所

株式会社 地球科学研究所

ロシア科学アカデミー 永久凍土研究所

ロシア科学アカデミー 永久凍土研究所

ロシア科学アカデミー 永久凍土研究所

### 1 はじめに

厚さ 500m 程度の永久凍土を有する東シベリア・ヤクーツク近郊には、レナ川東岸側に多くの湧水群が存在する。それらの湧水温は季節を通してほぼ 0°C であり、冬季にはアイシング (icing) と呼ばれる独特の氷結現象を生み出している。ところが湧水群の水文学的調査はこれまで詳細には行われておらず、涵養域の推定と地下水系、湧水量の年々変化などの調査がロシア科学アカデミー永久凍土研究所のグループによって行われているに過ぎない。彼らによると、湧水量が降水量に比較的良く応答する湧水群や、湧水量と降水量との間に相関の無い湧水群など、多様である。これらの差異には水文地質構造の他、永久凍土内の氷の存在量やサーモカルスト (凍土内の氷の融解による地盤の劣化現象) などが関わっているようである。

Smith et al. (2007) によれば、ユーラシア大陸から北極海に注ぐ河川流量のうち、冬季の日最低河川流量が、1980 年代以降徐々に増加してきている。その原因として流域内降水量の増加 (Adam and Lettenmaier, 2008) が考えられる一方、地球温暖化によって引き起こされた凍土や地下水の融解によって、それらの融解水が河川に流出し、河川流量が増加したとの推測もある (例えば Oelke et al., 2004; Pavelsky and Smith, 2006)。このような背景から、東シベリア永久凍土帯に分布する湧水群の地下水系を詳細に調査し、湧水量変動と気候変動・水循環変動との関わりを探るのは非常に興味深い。そこで本報告では、ヤクーツク近郊・レナ川東岸の湧水群の概略を紹介するとともに、CFCs や SF<sub>6</sub> を水文トレーサーに用いて地下水年代の推定を行った結果を示す。

### 2 研究対象地域と方法

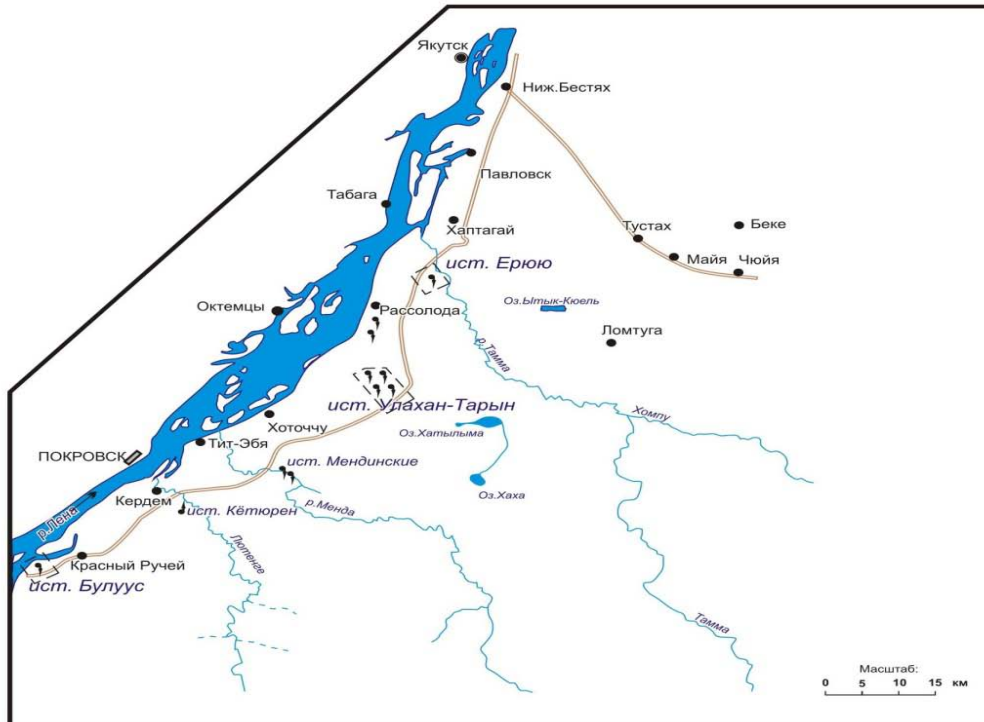
#### 2.1 研究対象地域

研究対象地域は、東シベリア・ヤクーツク近郊のレナ川東岸付近 (北緯 61° 40′ ・東経 130° 00′ ) である。この地域の基岩は古生代カンブリア紀の炭酸塩岩 (石灰岩・ドロマイト・泥灰岩) であり、その上部に中生代ジュラ紀の砂岩が不整合的にのる。さらに上部には新生代新第三紀や第四紀の風成/河成堆積物 (砂質土壌やシルト質土壌) がのっている。

研究対象地域と湧水の分布を図 1 に示す。図の北方はテュングリュウ段丘、中央から南方はベスチャフ段丘になっている。テュングリュウ段丘の表層数メートルの深さには氷楔 (ひょうせつ) などの地下水が多く存在するが、南方のベスチャフ段丘には地下水は少ないと言われている。図 1 の凡例 2 で示した 3 つの湧水群は全てベスチャフ段丘とレナ川河川敷との段丘崖に生じており、ベスチャフ段丘の永久凍土は

200m から 420m の厚さである。季節的に融解・凍結を繰り返す地表層（活動層：active layer）は 0.5m から 4.0m 程度であり、土壌の物性や土壌水分量によって異なる。

また、この地域には森林火災や道路建設などの後に起こるサーモカルスト（thermokarst）によって生じた湖沼が多く存在する。湖沼の地下はタリク（talik）と呼ばれる不凍結水状態になっている。凍土上地下水（supra-permafrost groundwater）は、活動層の下端の凍土を不透水層として、活動層内に存在する地下水である。一方、凍土内地下水（intra-permafrost groundwater）は、湖沼から連続するタリクが凍土内を地質の不連続面に沿って緩やかに流れる地下水であり、湖沼から湧水点にかけて「湖沼－タリク－地下水系（lake-talik-groundwater system）」を成すものである。



Map showing location of perennial springs on the Bestyakh terrace



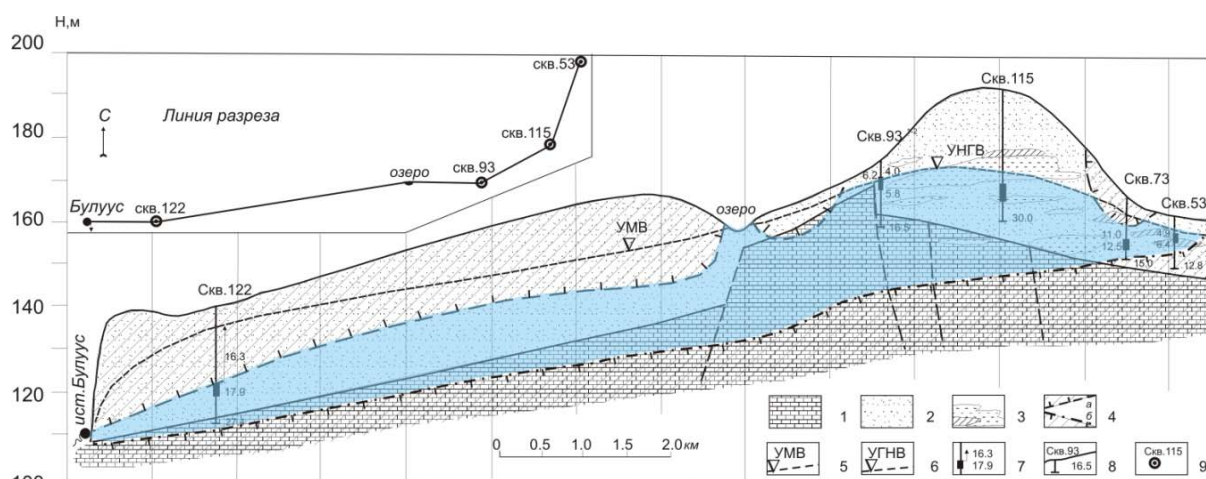
**Legend**

- 1 – gravity springs (a) and artesian springs (b)**
- 2 – detailed study sites (observation boreholes, gauges)**
- 3 – road.**

図1 研究対象地域と湧水の分布図

図1の凡例2に示した湧水群は北からエリュ（Eruu）、ウラハン タルン（Ulakhan-Taryn）、ブルース（Buluus）という3つの湧水群に大別できる。ウラハン タルンにはA, B, C, D, E という5つの湧水点が存在する（それらの名称は、永久凍土研究所によって付けられたものである）。上記3湧水群の湧水温は一年を通して0°C程度と一定ではあるが、湧水量と降水量との応答が良い湧水（ウラハン タルン）と悪い湧水（エリュ）がある。したがって両湧水の地下水涵養機構や流動機構は異なるものと予想されるが、詳細については不明のままである。

図2に、ブルース湧水の「湖沼－タリク－地下水系」に関する縦断面図を示す。



**Permafrost and groundwater section along the line of borings in the Buluus Spring area**

- 1 – Cambrian carbonate rocks; 2 – fine to medium sands;
- 3 – sands and sandy silts of the Tyungyulyu terrace;
- 4 – permafrost and its predicted boundaries at the top (a) and base (b) of a talik;
- 5, 6 – levels of intrapermafrost and suprapermafrost water, respectively;
- 7, 8 – borings and observation wells (numbers indicate well depths and filter spacing)
- 9 – borehole and well numbers

図2 ブルース湧水の「湖沼-タリク-地下水系」縦断面図 (図の左端の黒丸が湧水点である)

## 2.2 研究方法

近年 CFCs (chlorofluorocarbons ; フロン類) や SF<sub>6</sub> などの人工微量ガスを水文トレーサーに利用し、それらの地下水への溶解量から地下水年代 (地下水の滞留時間) を推定する研究が行われつつある (Busenberg and Plummer, 1992; Busenberg and Plummer, 2000; IAEA, 2006)。欧米や我が国において、CFCs や SF<sub>6</sub> などの水文トレーサーは過去 60 年前から現在にかけての比較的若い地下水年代推定に供されている。それらを永久凍土帯の湧水に応用することは、温暖化や降水量変動の観点において (永久凍土帯の湧水の年代が比較的若い可能性があるため) 有益な情報を提供するものと思われる。

上記各湧水の採水を、2009年7月28日~29日の2日間、および2010年7月28日~29日の2日間にそれぞれ実施した。2010年には上記3湧水全て (ただし、ウラハン タルンでは B, E 地点) で採水を実施したが、2009年にはブルースとウラハン タルン (A, B 地点) のみで採水した。採水には専用の採水用ガラス瓶 (CFCs : 125 mL, SF<sub>6</sub> : 500 mL) を用い、大気に直接接触しないように注意した。具体的には、ステンレス容器の中に採水用ガラス瓶とキャップを入れ、ナイロンチューブを通して採水ポンプから湧水をガラス瓶の底に導入し、ステンレス容器から水をオーバーフローさせた。オーバーフローさせる量はガラス瓶の容量の3倍以上とした。その後水中でガラス瓶に蓋をし、絶縁密着テープにより蓋をしっかりと固定した。

採水したサンプルの一部を2010年8月6日に日本に持ち帰り、同年9月6日までに、株式会社地球科学研究所で処理・分析した。この時分析した試料は、ブルース (2009年と2010年の両年)、ウラハン タルン A (2009年採水) およびウラハン タルン E (2010年採水) である。なお2009年に採水したサンプルは、日本に持ち込むまでの約1年間、ロシア科学アカデミー 永久凍土研究所内にて常温で保管された。

### 3 結果

#### 3.1 分析結果

分析結果を表1に示す。ブルースとウラハン タルンの CFCs 濃度と SF<sub>6</sub>濃度は、両地点ともに 2009 年と 2010 年でほぼ同レベルの値を示した。1年間保存していた 2009 年の試料についても、採水時の濃度を保持していることが伺える。

CFCs 濃度は両地点とも低い値であるが、ブルースでは3種の CFCs が有意に検出されたのに対し、ウラハン タルンでは CFC-11 と CFC-113 が検出限界レベルで非常に低かった。両湧水とも CH<sub>4</sub>が検出されたため、還元的な環境下にあったものと推測される。両湧水とも涵養源にサーモカルスト湖沼群をもつことから、妥当な分析結果である。ここで注意すべきは、溶存酸素濃度が 1 mg/L 以下の地下水では、微生物分解によって地下水中の CFCs 濃度が減少することが過去の研究で報告されていることである。両湧水とも微生物分解が寄与している可能性が高いため、今後、溶存酸素濃度の分析を行う必要がある。しかしながら、3種の CFCs が全て検出されたブルース湧水については、微生物分解の影響は比較的小さい。したがってブルースには、1960 年代以降に涵養された地下水が含まれているものと判断できる。

SF<sub>6</sub>濃度は 1.97~3.75 fmol/kg の範囲にあり、ブルースで高くウラハン タルンで低かった。両湧水を比較した場合、SF<sub>6</sub>濃度の大小関係は、CFCs 濃度の大小関係と同様であった。したがって、ブルースの涵養年代は、ウラハン タルンの涵養年代よりも新しい可能性が高い。

表1 CFCs 濃度と SF<sub>6</sub>濃度の分析結果

No.	試料名	採水年	CFCs (pg/kg)			SF <sub>6</sub> (fmol/kg)
			CFC-12	CFC-11	CFC-113	
1	ブルース	2009	117	179	14	3.30
2	ブルース	2010	109	160	12	3.75
3	ウラハントルン A	2009	32	1	0	2.01
4	ウラハントルン E	2010	18	21	0	1.97

#### 3.2 大気濃度への換算

地下水の CFCs 年代と SF<sub>6</sub>年代 (みかけの涵養年代) は、試料水の CFCs 濃度と SF<sub>6</sub>濃度をヘンリーの溶解平衡の式を用いて、地下水が涵養された時の大気濃度 (EAC: equivalent air concentration) に変換し、その濃度を過去の大気濃度曲線と対比することによって得た。ヘンリーの溶解平衡式によれば、地下水に溶け込む CFCs と SF<sub>6</sub>のガス量は温度と気圧に依存する。そのため、EAC の算出には地下水涵養時の涵養温度と気圧 (涵養標高) のデータが必要となる。ここでは、涵養温度として湧水の水温 (0°C) を、涵養標高として 150 m を適用した。大気濃度については、公表されている北半球のバックグラウンド濃度 (IAEA, 2006) を用いた。計算した EAC 値を表2に示す。

#### 3.3 CFCs 年代と SF<sub>6</sub>年代

上記で算出された地下水の EAC 値と大気の大気 CFCs 濃度・SF<sub>6</sub>濃度を比較し、湧水の CFCs 年代・SF<sub>6</sub>年代 (みかけの涵養年代) を求めた。また、ピストン流モデルによる湧水の滞留時間と、指数関数モデル (完全混合モデル) を使って推定した平均滞留時間を表3に示す。どちらの湧水も、CFCs 年代の方が SF<sub>6</sub>年代よりも 40 年古いという結果になった。

表2 EAC 値と CFCs 年代・SF<sub>6</sub>年代 (みかけの涵養年代)

No.	試料名	採水年	大気換算濃度 (EAC 値:pptv)				涵養年代 (みかけ年代)			
			CFC-12	CFC-11	CFC-113	SF <sub>6</sub>	CFC-12	CFC-11	CFC-113	SF <sub>6</sub>
1	ブルース	2009	105	35	6	5.4	1968	1967	1970	2004
2	ブルース	2010	98	31	5	6.2	1968	1966	1969	2007
3	ウラハントルン A	2009	29	0	0	3.3	1959	1947	1953	1994
4	ウラハントルン E	2010	16	4	0	3.2	1955	1955	1953	1994

表3 地下水の滞留時間

No.	試料名	採水年	滞留時間 (ピストン流モデル)				平均滞留時間 (完全混合モデル)			
			CFC-12	CFC-11	CFC-113	SF <sub>6</sub>	CFC-12	CFC-11	CFC-113	SF <sub>6</sub>
1	ブルース	2009	42	43	40	5	N/A	N/A	N/A	4
2	ブルース	2010	43	45	41	3	N/A	N/A	N/A	3
3	ウラハントルン A	2009	51	63	57	15	N/A	N/A	N/A	20
4	ウラハントルン E	2010	56	55	57	16	N/A	N/A	N/A	22

## 4 考察

### 4.1 CFCs 年代と SF<sub>6</sub>年代の不一致について

CFCs と SF<sub>6</sub>の特性を考慮した場合、両トレーサーから推定された地下水涵養年代の不一致の原因として、以下の3点が考えられる。

- 1) 微生物分解や吸着によって、地下水中の CFCs 濃度が減少し、CFCs 年代が実際よりも古くなった。
- 2) 岩石由来の SF<sub>6</sub>付加によって、地下水中の SF<sub>6</sub>濃度が上昇し、SF<sub>6</sub>年代が実際よりも新しくなった。
- 3) Excess air によって、溶解平衡以上の大気が涵養時に過剰に溶解した。特に微量ガスである SF<sub>6</sub>でその効果が顕著に現れ、地下水中の SF<sub>6</sub>濃度が上昇し、SF<sub>6</sub>年代が実際よりも新しくなった。

1) については、上述のように試料水から CH<sub>4</sub>が検出されたことにより、涵養域が還元環境下にあると推定される。特にウラハントルンでは湧水点が多量有機物の多い環境にあることから、CFCs 濃度が低い理由として微生物分解や吸着による CFCs 濃度の減少がある可能性は高い。微生物分解や吸着の影響は、CFCs の種類によって異なるため、これらの影響がある場合には、CFCs の間で年代値に大きな差異が生じる。ウラハントルンでは CFC-12, 11, 113 の涵養年代が異なるため、これらの影響が出ている可能性は否定できない。ブルースについては CFC-12, 11, 113 の涵養年代がほぼ同じであることから、微生物分解や吸着の影響を大きく受けているとは考えにくい。

2) については、対象地域の基岩が古生代カンブリア紀の炭酸塩岩や中生代ジュラ紀の砂岩であることから、火山岩地域に比べて SF<sub>6</sub> の付加の影響は少ないものと思われる。しかしながら、SF<sub>6</sub> の付加の可能性を完全に否定することはできない。

3) については、前述のように、東シベリア永久凍土帯に分布する湧水群の涵養域には、複数の湖沼が存在する。そのため SF<sub>6</sub> のような微量ガスを用いて地下水年代を推定しようとする場合、湖沼表面においてガスが過剰に溶解する (Heaton and Vogel, 1981)。その効果は、溶解度が低く、湖沼水や地下水に溶存している量が少ないガス種 (CFCs よりも SF<sub>6</sub>) で大きい。そのため、SF<sub>6</sub> をトレーサーに用いて地下水年代推定を行う際には、ガスの過剰溶解 (excess air) の効果を考慮する必要があるが、本研究ではその定量的見積を行えなかった。

#### 4.2 まとめと今後の研究課題

以上の結果と考察を総合すると、本研究から確実に言える事項は、以下の 3 点である。

- 1) ブルース湧水よりも、ウラハン タルン湧水の涵養年代は古い。
- 2) ブルース湧水の涵養年代は、1968 年以降、2007 年以前である。
- 3) ウラハン タルン湧水の涵養年代は、1955 年以降、1994 年以前である。

本研究で対象とした湧水の、CFCs 年代と SF<sub>6</sub> 年代 (みかけの涵養年代) が 1950 年代以降 2007 年以前であったことから、トリチウム濃度を分析し、トリチウムによるみかけの涵養年代を推定できる見通しが付いた。今後、これらの湧水のトリチウム濃度の分析に着手したい。

## 5 おわりに

温暖化とそれに伴う降水量変化によって、活動層の深さが深くなってきたことが、近年の研究によって明らかにされている (Ohta et al., 2008; Iijima et al., 2009 など)。そのことによって地下水が融解し年代の古い地下水が湧出しているのか否かを調べることは、地球研シベリアプロジェクトのみならず、雪氷水文学分野において重要な研究テーマである。本研究では、ヤクーツク近郊・レナ川東岸の湧水群の概略を紹介するとともに、CFCs や SF<sub>6</sub> を水文トレーサーに用いた地下水年代の推定を行った。

ブルース湧水とウラハン タルン湧水の試料水を分析した結果、CFCs 年代と SF<sub>6</sub> 年代 (みかけの涵養年代) は、1950 年代以降 2007 年以前であった。今後、トリチウムによるみかけの涵養年代を推定し、より正確な地下水年代を決定する必要があるものの、ある程度の年代推定値 (の幅) が得られた。

この地域の地下水が融解し、年代の古い地下水が湧出しているのか否かを調べるためには、今後も継続して湧水の採水と分析を行っていく必要がある。また、より正確に「湖沼-タリク-地下水系」を把握するために、地温鉛直プロファイル観測の多地点計測や、電気探査などを行っていく必要がある。

## 6 参考文献

- Adam, J.C. and Lettenmaier, D.P. (2008): Application of new precipitation and reconstructed streamflow products to streamflow trend attribution in Northern Eurasia. *Journal of Climate*, **21**, 1807-1828.
- Busenberg, E. and Plummer, L.N. (1992): Use of chlorofluorocarbons (CCl<sub>3</sub>F and CCl<sub>2</sub>F<sub>2</sub>) as hydrologic tracers and age-dating tools: The alluvium and terrace system of central Oklahoma. *Water Resources Research*, **28**,

2257-2283.

- Busenberg, E. and Plummer, L.N. (2000): Dating young groundwater with sulfur hexafluoride: Natural and anthropogenic sources of sulfur hexafluoride. *Water Resources Research*, **36**, 3011-3030.
- Heaton, T.H.E. and Vogel, J.C. (1981): "Excess air" in groundwater. *Journal of Hydrology*, **50**, 201-216.
- Hiyama, T. and Asai, K. (2010): Residence time estimation for vulnerability assessment of supra-permafrost and intra-permafrost groundwater in central Yakutia. Conference Proceedings, *Forum for Young Permafrost Scientists, -The past, present and future of geocryology-* (Grigoriev, M.N. and Alekseeva, O.I., eds.), Melnikov Permafrost Institute, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, 5-10.
- IAEA (2006): *Use of chlorofluorocarbons in hydrology - A Guidebook*. IAEA, Vienna, 277p.
- Iijima, Y., Fedorov, A.N., Park, H., Suzuki, K., Yabuki, H., Maximov, T.C. and Ohata, T. (2009): Abrupt increases in soil temperatures following increased precipitation in a permafrost region, central Lena River Basin, Russia. *Permafrost and Periglacial Processes*, **21**, 30-41.
- Oelke, C., Zhang, T.J. and Serreze, M.C. (2004): Modeling evidence for recent warming of the Arctic soil thermal regime. *Geophysical Research Letters*, **31**, L07208, doi:10.1029/2003GL019300.
- Ohta, T., Maximov, T.C., Dolman, A.J., Nakai, T., van der Molen, M.K., Kononov, A.V., Maximov, A.P., Hiyama, T., Iijima, Y., Moors, E.J., Tanaka, H., Toba, T. and Yabuki, H. (2008): Interannual variation of water balance and summer evapotranspiration in an eastern Siberian larch forest over a 7-year period (1998-2006). *Agricultural and Forest Meteorology*, **148**, 1941-1953.
- Pavelsky, T.M. and Smith, L.C. (2006): Intercomparison of four global precipitation data sets and their correlation with increased Eurasian river discharge to the Arctic Ocean. *Journal of Geophysical Research*, **111**, D21112, doi:10.1029/2006JD007230.
- Smith, L.C., Pavelsky, T.M., MacDonald, G.M., Shiklomanov, A.I. and Lammers, R.B. (2007): Rising minimum daily flows in northern Eurasian rivers: A growing influence of groundwater in the high-latitude hydrologic cycle. *Journal of Geophysical Research*, **112**, G04S47, doi:10.1029/2006JG000327.

## G2c (モデリングチーム) 活動要約

山崎 剛

東北大学大学院 理学研究科

### 1. 当初の目的

シベリアにおける水・炭素循環のプロセス研究を推進するために、①陸面モデルの高度化、②流出モデルの高度化、③モデルによる過去の復元と将来予測を行う。具体的には以下のような課題を設定した。①は陸面モデル 2LM に透水過程、不凍水の扱いを改良し、流出モデルに現実的な「早い成分」を供給すること、炭素過程を導入して潜在的応答特性の考え方が使えるかどうかを検討すること。②は結氷・解氷のモデル化を高度化すること、陸面モデルとの結合を進め、地中成分をモデル化すること。③はルーチン気象データにより、過去の土壤水分、水・熱フラックスを復元することと、植生が変化しない範囲の近未来について土壤水分、河川流量、フラックスの変動予測を行うこと。

### 2. 研究の進行状況

陸面モデルおよび流出モデルの高度化について、陸面モデルからの余剰水について、表層と深部からの成分を分けて出力できるようにした。流出モデルの結氷・解氷日はおおむね推定可能となった。陸面モデルと流出モデルの結合は順調に準備が進んでいる（山崎、八田、朴）。

過去 40 年間の水・熱環境に関して、2LM と植物変動を評価できる陸面モデル CHANGE でシミュレーションを行った。年々変動の結果は両モデルでおおむね一致したが、トレンドなどは微妙な違いがあり今後検討を要する。また、G2a による土壤水分復元結果とは良い対応が見られたが、絶対値は 2LM が半分程度であった（山崎、朴）。

モデルの入力や検証に欠かせない植生パラメータ、植物フェノロジー、積雪期間などについて、衛星データを用いて解析を行った。衛星データからの森林変化域の時空間推定が可能となり、さらにその成果による広域推定結果の原因解析から、森林変化の原因のほとんどが森林火災である可能性が示唆された。これにより、火災域について G1 の結果との比較・連携が可能となった（山本）。

非静力大気モデルを用いて、蒸発散、降水に重要な陸面パラメータは蒸発効率とアルベドであることを明らかにした。森林減少を伴う水体の増加は水循環に大きな影響を与えることが分かった（吉田）。

### 3. 今後の課題

陸面モデルの不凍水、透水過程、炭素について高度化を推進する。G1 の BEAMS も含めて水および炭素に関するモデルの相互比較を進め、各モデルの特徴把握と改良を進める。陸面モデルと流出モデルの結合を完成し、より現実的な地下水寄与を含めた流出計算を行う。G3 へ河川情報を提供し、洪水解析などに資する（山崎、八田、朴）。

新しく整備されているルーチン気象データセット(BMDS ver.5)に対応して、モデルのフォーシングデータを再構築する（山本）。

温暖化シナリオを考慮し、非静力大気モデルにより近未来における降水量の変動を予測し、土壤水分、河川流量、水・熱フラックスの変動を評価する（吉田）。



# 陸面モデル 2LM によるタイガ林の水・熱収支シミュレーション

山崎 剛

東北大学大学院 理学研究科

## 1 はじめに

東シベリアのヤクーツク近郊のタイガ林（スパスカヤパッド）では 1998 年以來、タワーによる気象・水文観測がおこなわれ、約 10 年のデータが蓄積された。ようやく水・熱環境の変動に関して観測データから議論できるようになってきた。その中で、2004 年以降、土壌水分と温度が顕著に上昇し、夏期の凍土融解層が厚くなる状況が出現した (Ohta et al., 2008; Iijima et al., 2010)。

陸面過程モデルは気象要素を入力することにより、様々な陸面状態について、大気との水や熱の交換量や余剰の水分量を計算できる。そこで、1 次元陸面過程モデル 2LM を用い、タワー観測開始以前にさかのぼり、水・エネルギー収支の長期推定を行った。結果について植物変動を評価できる陸面モデル CHANGE と比較した。また、G2a グループによる土壌水分復元の初期結果とも比較した。さらに、近年の土壌状況の急激な変化の再現を試みた。土壌水分や温度の上昇に対し、どのような気象要素やパラメータが効いているのかを、モデル計算により考察した。

## 2 研究方法

### 2.1 モデル

モデルは植生・積雪・土壌の三つのサブモデルからなる。日射、長波放射、気温、比湿、風速、降水量を入力し、積雪・土壌の温度や水分、大気・植生・土壌各層間のフラックスを計算できる (Yamazaki, 2001; Yamazaki et al., 2004)。図 1 に植生と積雪のサブモデルの概念図を示す。植生は葉の部分を下 2 層に分けた熱収支モデルである。積雪は積雪深に応じて層の数を増やす多層モデルで、寒冷地で卓越するしもぎらめ雪を表現できる。土壌は比較的シンプルな多層モデルで、 $-1 \sim 0 \text{ }^\circ\text{C}$  において見かけの熱容量を大きくする形で土壌の融解・凍結の潜熱を計算する。不透水層を 2 m に仮定し、各層からの流出成分が余剰水として計算される（分布型流出モデルの入力となる）。

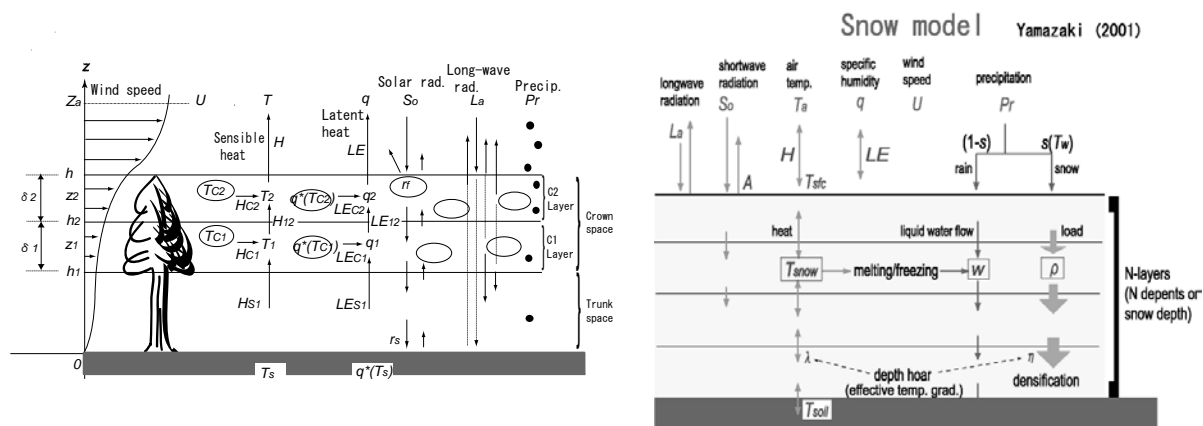


図 1 陸面モデル 2LM の概念図。左: 植生サブモデル、右: 積雪サブモデル。

## 2.2 データ

シベリアのルーチン気象データをまとめた Baseline Meteorological Data in Siberia (BMDS) (Suzuki et al., 2006) の近日正式公開となる最新版 (ver. 5) を用いた。期間は 1966 年から 2006 年である。補足的に近年の土壌状況変化のシミュレーションに関しては、NCDC Global Summary of Day (2006-2007 年) も用いた。モデルに必要な日射量と下向き大気放射量は BMDS に含まれていないため、日照時間等から推定した。長期シミュレーションはヤクーツク近郊のタイガ林 (スパスカヤパッド) を対象として、Yamazaki et al. (2007) と同様に実験式によって、ヤクーツク市内の測定値をタイガ上の推定値に変換した。なお、1983 年は風速データが欠損しているため、他の年から求めた月平均風速を代用した。土壌の温度と水分の初期値は、あらかじめモデルで全期間の計算を行い、その 1986 年 1 月 1 日の値を用いた。

## 3 結果

### 3.1 長期の水・熱収支

図 2 に 2LM によって計算された、各年の暖候期 (5~8 月) で平均した熱フラックスの時系列を示す。熱フラックス各項に目立ったトレンドは見られない。また、各項ともに変動は  $\pm 10 \text{ W m}^{-2}$  程度の範囲に収まっている。正味放射量と顕熱フラックスの間には正の相関がみられるが、逆に正味放射量と潜熱フラックスには負の相関がみられる。正味放射量が大きい年は、好天が多くポテンシャル蒸発量  $E_p$  も大きい。このような年は乾燥傾向があり、蒸散が抑制されているものと思われる。実際、 $E_p$  が大きい年には  $E/E_p$  が小さい傾向がある。一方、 $E/E_p$  は開葉日が遅い年には小さくなる傾向もある。これはその年の蒸散量が植物活動期間の長さ依存するためである。以上の結果は 1986 年から 2000 年の期間について Yamazaki et al. (2007) が示した結果と同様である。

図 3 に鉛直積算した土壌水分の時系列を示す。一般に融雪期に増加してその後減少し、秋に再び増加して冬期はほぼ一定値を示す変化をしている。長期的には 10 年強の周期的な変化があるように見える。2006 年は過去 40 年間で最も高い水準にあることがわかる。

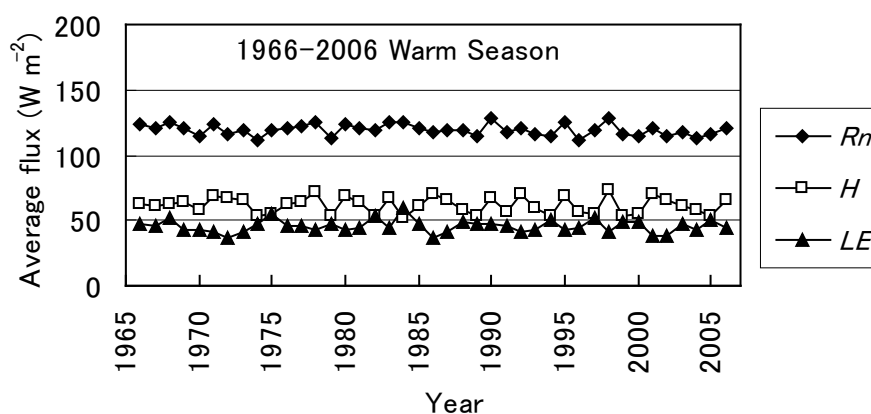


図 2 暖候期 (5~8 月) 平均の熱フラックスのシミュレーション結果。

◆ : 正味放射量、□ : 顕熱フラックス、▲ : 潜熱フラックス。

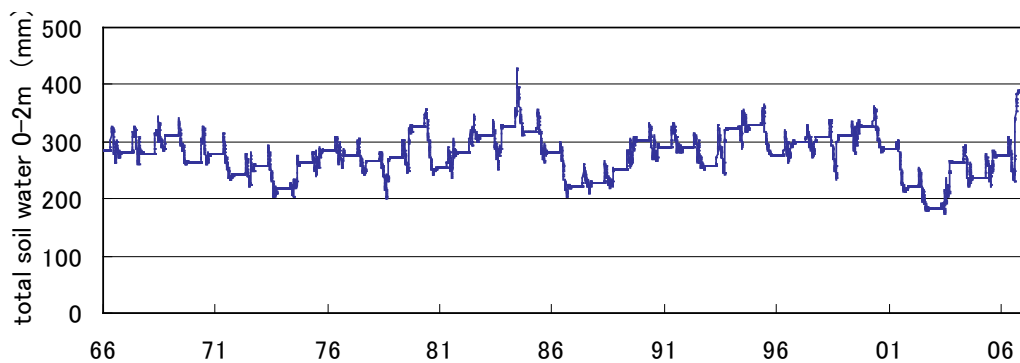


図3 モデルによる土壌水分量。0 - 2 m の積算値 (mm)。

陸面モデルで計算される余剰水（流出モデルの入力）は、ヤクーツクを対象とした計算では、融雪期の数日から10日程度のみ現れた。比較のため、レナ川上流域のキレンスクと支流であるアルダン川流域のウスティマヤについても計算を行った。キレンスクについては、融雪期のほか夏期にも余剰水が計算された。融雪期の流出は土壌表層あるいはそのすぐ下から出ているが、夏期は深層おそらく凍土融解層最下部から出ている。ウスティマヤは融雪期がほとんどであるが、まれに秋にも余剰水が計算された。

### 3.2 急激な近年の変化

図4に2003年以降の土壌温度と水分の観測値との比較を示す。水分のモデル計算値は固相・液相を加えたものだが、観測はTDRセンサーによって行われ、冬期は固相を含めた量を示していない。温度はやや高めに計算するものの最近の昇温を再現できた。一方、水分は増加傾向を示すものの観測されているようなドラスティックな上昇は再現できなかった。Ohta et al. (2008) は水収支の観測結果から、側方あるいは深部から2004年は43.3 mm、2005年は167.0 mm、2006年は101.1 mmの水供給がないと土壌水分の上昇は説明できないと考察しており、それと整合するものである。

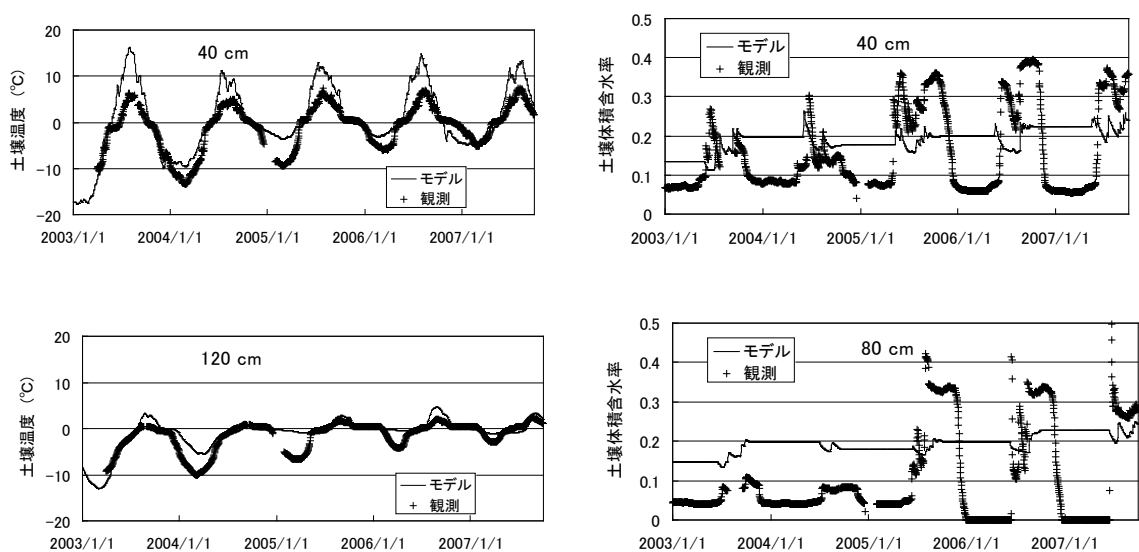


図4 土壌温度・水分のモデル計算値と観測値の比較。

## 4 考察

### 4.1 相互比較

朴によって開発された植物変動や炭素収支を評価できる陸面モデル CHANGE (Coupled Hydrological and Biogeochemical Model) による結果と比較した (図 5)。正味放射量が 2LM の方がやや大きめで、特に正味放射が小さい年にその傾向が強い。また、CHANGE では正味放射量が長期的に減少するトレンドが見られる。顕熱や潜熱フラックスの変動は両モデルでよく対応している。土壌水分の結果を比較すると、表層近くについては、両モデルはおおむね一致するが、30~60 cm 深については 2LM でやや過小、CHANGE ではやや過大となる傾向があった。土壌温度は 2LM で年振幅がやや大きめに計算された。これは層の切り方の関係で比較深度が異なることも一因と考えられる。

次に G2a グループによる土壌水分復元の暫定的な結果 (鄭ら、本報告書) と 2LM による土壌水分を比較した (図 6)。両者の変動パターンはよく対応している。しかし、絶対値はモデル (2LM) の方が半分程度と小さくなった。この点については検討が必要である。

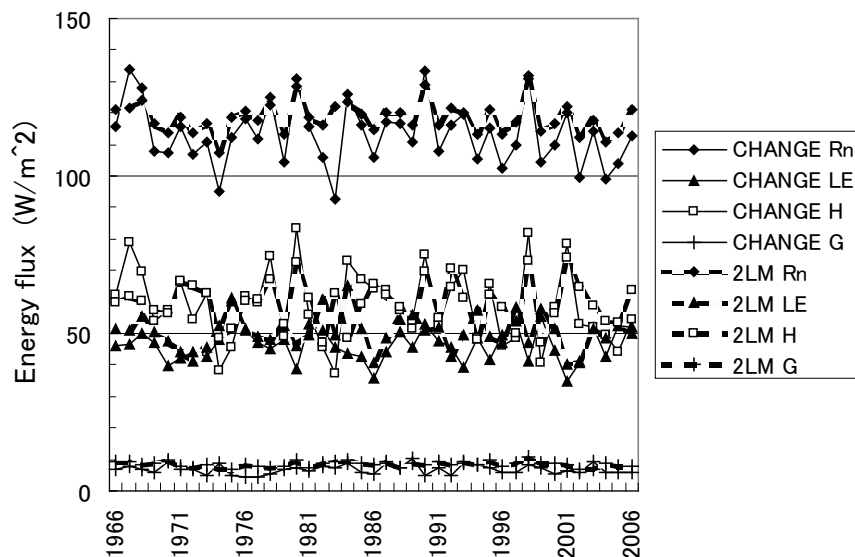


図 5 陸面モデル CHANGE と 2LM の暖候期平均熱フラックスの比較。

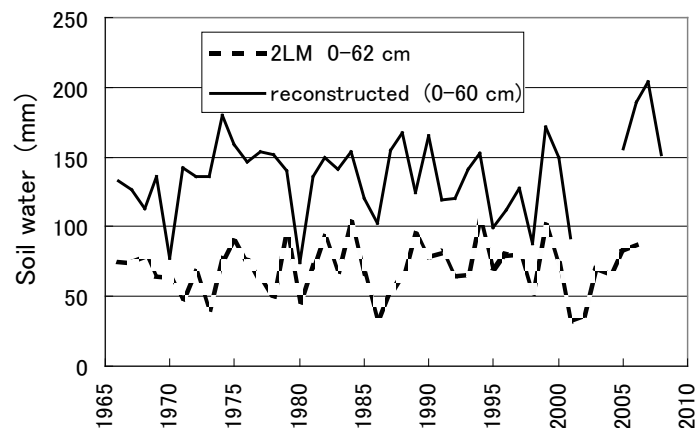


図 6 年輪解析から復元した土壌水分量とモデルによるシミュレーションとの比較 (7月15日~9月15日の期間)。灰線：陸面モデル 2LM による結果 (0-62 cm)。黒線：年輪解析からの復元値 (0-60 cm)

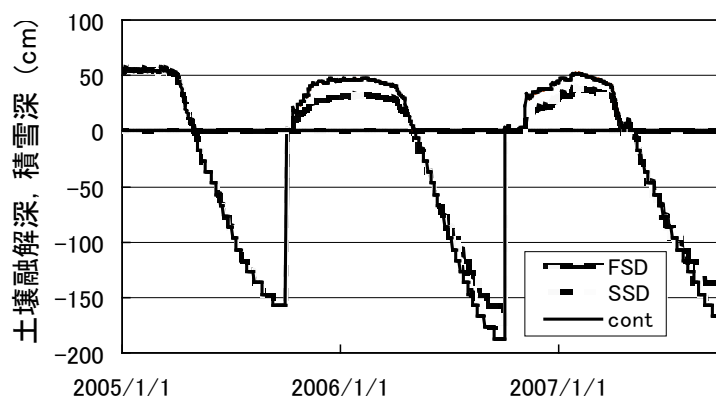


図7 降水量が融解深に及ぼす影響。平均に対する標準偏差の割合分だけ降水を減少させた計算。  
FSD: 10、11月の降水量を減少。SSD: 5～9月の降水量を減少。cont: 実際の降水量による計算

#### 4.2 近年の融解深増加の要因

観測データを見る限り2003年以降気温に上昇傾向は見られない。融解深の増加には夏の降水量(秋の含水率)の増加あるいは初冬の降雪(積雪深)の増加が影響していると見られる(Iijima et al., 2010)。1986年から2006年までの降水量は、夏期(5～9月)は平均178 mm(標準偏差55 mm)、初冬(10, 11月)は平均40 mm(標準偏差17 mm)の降水量であった。2004年以降の初冬降水量が多い傾向がある。

初冬と夏期のどちらの降水が融解深増加に強く影響しているのかを調べるため、モデルによる年最大融解深と前年の夏期(5～9月)および初冬(10, 11月)の降水量の関係を調べたところ、夏期降水量よりも初冬降水量と融解深がよい相関を持つことがわかった。次に、初冬の降水量と夏期の降水量をそれぞれ平均に対する標準偏差の割合分だけ減少させた実験を行った。図7にその結果を示す。夏期の降水を減少させても融解深には目立った変化が生じなかった。一方、初冬の降水量を減少させると、夏期の融解深が30 cm程度小さくなった。これは初冬の降水が少ないと冬季の積雪量が少なくなり、土壌が効果的に冷却されるためと考えられる。このことから近年の融解深の増加には初冬の降水量の増加が効いていることが示唆される。

#### 4.3 今後の課題

陸面モデルの透水過程、土壌不凍水、炭素について高度化を推進する。G1グループ佐々井のBEAMSも含めて水および炭素に関するモデルの相互比較を進め、各モデルの特徴把握と改良を進める。陸面モデルと八田による流出モデルの結合を完成し、より現実的な地下水寄与を含めた流出計算を行う。

余剰水分は流出モデルの入力として流出解析に重要である。陸面モデルからの余剰水は土壌スキームのほか、土壌の物理特性の与え方、水分の初期値などに依存するため、さらに詳細な検討が必要である。

### 5 おわりに

陸面モデル2LMを用いて、1966-2006年のタイガ林での水・熱収支シミュレーションを行った。熱収支各項に目立ったトレンドは見られなかった。陸面モデルCHANGEの結果と比較したところ、CHANGEでは正味放射量にやや減少する傾向が見られた。土壌水分について、G2aグループの暫定復元結果と比較したところ、よい対応が見られたが、絶対値は半分程度となった。

モデルからの余剰水について、表層とそれ以外に分けて出力した。ヤクーツクでは融雪期のみ流出したが、上流のキレンスクでは夏期も流出が発生した。融雪期は表層付近から、夏期は融解層下部から流出していた。

2005年以降、土壌水分の増加、温度上昇が計算された。しかし、観測のような急激な変化は再現できなかった。土壌の昇温には初冬の降水量(積雪深)が効いていると推定される。

## 参考文献

- Iijima, Y., Fedorov, A.N., Park H., Suzuki, K., Yabuki, H., Maximov, T.C., Ohata, T., 2010: Abrupt increase in soil temperature following increased precipitation in a permafrost region, the central Lena River basin, Russia. *Permafrost and Periglacial Processes*, **21**, 30-41.
- Ohta, T., Maximov, T.C., Dolman, A.J., Natai, T., van der Molen, M.K., Kononov, A.V., Maximov, A.P., Hiyama, T., Iijima, Y., Moors, E.J., Tanaka, H., Toba, T., Yabuki, H., 2008: Interannual variation of water balance and summer evapotranspiration in an eastern Siberian larch forest over a 7-year period (1998–2006). *Agric. For. Meteorol.* **148**, 1941–1953.
- Suzuki, R., Razuvaev, V.N., Bulygina, O.N., and Ohata, T., 2006: Baseline Meteorological Data in Siberia Version 4. Institute of Observational Research for Global Change, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, Yokosuka, Japan.
- Yamazaki, T., 2001: A one-dimensional land surface model adaptable to intensely cold regions and its applications in Eastern Siberia. *J. Meteor. Soc. Japan*, **79**, 1107-1118.
- Yamazaki, T., Yabuki, H., Ishii, Y., Ohta, T. and Ohata, T., 2004: Water and Energy Exchanges at Forests and a Grassland in Eastern Siberia Evaluated using a One-dimensional Land Surface Model. *J. Hydrometeorology*, **5**, 504-515.
- Yamazaki, T., Ohta, T., Suzuki, R. and Ohata, T., 2007: Flux variation in a Siberian taiga forest near Yakutsk estimated by a one-dimensional model with routine data, 1986-2000. *Hydrological Processes*, **21**, 2009-2015.

# Spasskaya Pad の CO<sub>2</sub> 収支のシミュレーション

朴 昊澤

海洋研究開発機構 地球環境変動領域

## 1 はじめに

近年北極域では地球温暖化や人間活動の影響により、北極氷の低下、大川流出量の増加、永久凍土の減少、及び湖沼域の増大などの多くの変化が見られている。本プロジェクトの研究サイトであるヤクーツクの Spasskaya Pad (SP) においても、近年、気温・降水量の増加による活動層の急増や土壌の湿潤化の著しい変化が観測されている (Iijima et al., 2010)。このような変化により植物もダメージを受け、観測サイトの周辺では枯死木が多数出現している。これらの変化は、植物生態系の水・炭素収支にも影響していたと考えられるが、観測データの蓄積が短いため、その影響を評価するのは困難である。そのため、陸面モデル CHANGE を用いて SP での過去 40 年間にシミュレーションを行い、炭素収支の変動を評価した。その結果を報告する。

## 2 研究方法

### 2.1 陸面モデル CHANGE

北極域の水文プロセスでは、熱帯域では見られない特異な要素が存在し、それらの諸プロセスに対する影響は極めて大きい。そのため、ある要素の変化は、他の要素との相互関係を通して、水文、生態・生理プロセスに影響し (図 1)、その地域またはグローバルスケールの気候に影響するまでにその連鎖が拡大して行く。CHANGE は寒冷域で見られるコンポーネントや水文プロセスと植物動態モデルをカップリングすることにより、時・空間スケールでの一連の変化が評価できるモデルである。水、熱及び CO<sub>2</sub> 収支以外にも北極域で見られる積雪・融雪、凍土、土壌の結氷・融解、及び厚いリター層などを考慮している。

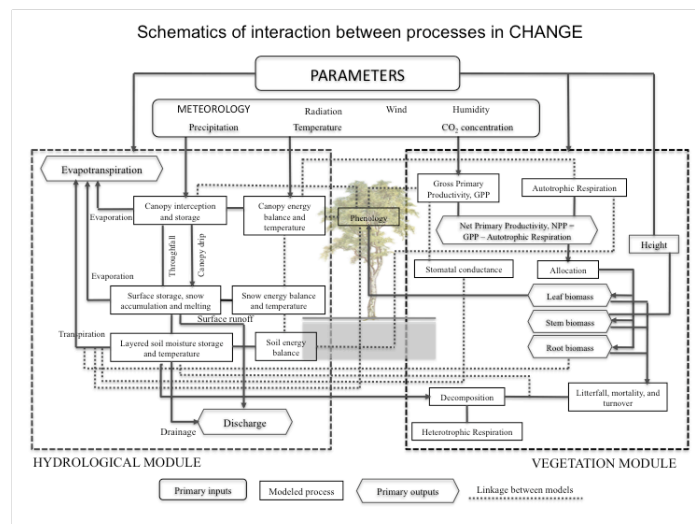


図 1. CHANGE の要素間の相互作用の模式図

ここでは、CHANGE の主な特徴のみ記述する。キャノーピー、土壌、及び積雪面上でのエネルギー収支を解けることにより、地表面または気候の変化が諸過程に及ぼす影響をフィードバックしている。根、リター層及び有機物の変動が土壌水分と地温への影響を動的に表現している。特に、土壌内の有機物の分解プロセスと地温・

土壌水分との相互関係の評価は、モデルの進歩の一つである。土壌水分においては、液体水と氷に区別してそれぞれの変動を計算することにより、凍土変動と水文プロセスとの相互関係の評価することができる。葉量の変動の正確な表現は、北極域の諸過程を評価することにおいて非常に重要である。気象条件と土壌環境を考慮した植物のフェノロジーモデルにより葉量の季節・経年変化を予測する。

## 2.2 気象データとシミュレーション

CHANGE のシミュレーションには、気温（最高、最低）、降水量、日射量、湿度、及び風速の連続した日データが必要である。今回、SP のシミュレーションのために、ヤクーツクの気象ステーションの観測データ (BMDS 5.0) を用いて 1966–2006 年を対象にモデルを適用して、SP の水、熱、及び CO<sub>2</sub> 収支を評価した。シミュレーションの結果の検証は、GAME Siberia プロジェクト以来 (1998 年) の観測データとの比較を通して行った。日変化と季節変化に対するモデルのパフォーマンスに関しては Park et al. (JGR, in submitted) が詳細に記述している。また、エネルギー収支の検証の結果は、本報告書の山崎の結果を参考にされたい。本報告では、CO<sub>2</sub> 収支の結果を主に報告する。

## 3 結果及び考察

### 3.1 気象環境

図 2 はヤクーツクの気象ステーションで得られた 1966 年以降の気象要素の経年変化を表す。降水量は年々変動が大きいですが、顕著なトレンドは見られない。むしろ年間降水量が若干減少している。冬季・夏期の降水量においても同様である。年降水量の 75% は夏期に集中している。2002 年以降降水量の増加が著しい。しかし、気温においては、降水量と異なり、年々増加しているトレンドが明確である。その現象は冬季と夏期においても同じである。気温の増加トレンドの中で、1988 年に気温上昇が異例的に大きく、その後一定の気温を保っているトレンドを示す特徴が見られる。1966–2006 年間で 1.5°C の気温上昇があった。過去数十年で東シベリアでは冬季において約 7°C また 1–2°C の年平均気温の増加が観測された (Dolman et al., 2008)。気温上昇の中で、日射量は反対に減少傾向にある。日射量の減少はエネルギー収支の純放射量の減少の原因でもある (山崎の報告の図 5)。

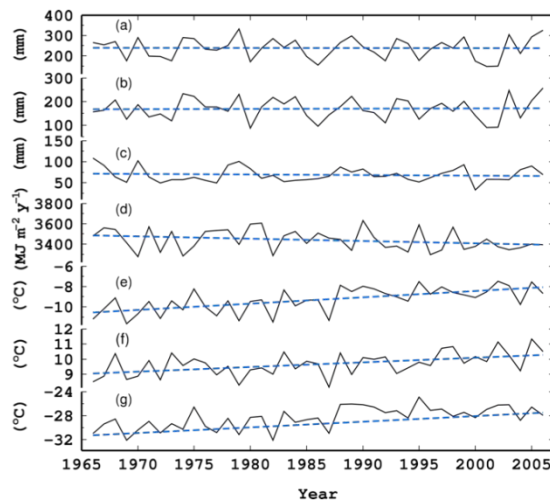


図 2. ヤクーツクの 1965–2006 年間の気象環境。年降水量(a)、夏季(b)及び冬季(c)の降水量、日射量(d)、年平均(e)、夏季(f)及び冬季の気温(g)。

### 3.2 葉面積指数の季節変化

北極域での葉量の変動は、融雪や凍土融解などと深く関係している。そのため、葉量の正確な予測は不可欠で



ある。図3はCHANGEにより予測された2005年において葉面積指数(LAI)の季節変化の観測値との比較を示す。観測値としてはポータブル測器(LAI-2000)から観測された値と人工衛星MODISから推定された値を用いた。モデルの予測は観測値とのよく一致している。特に、開葉の時期は両観測値との違いは大きくない。この正確な予測は、フェノロジーによる凍土融解時期への影響は考えにくいことを示唆する。一方、落葉時期はモデル予測がMODISより約2週間早い。しかし、LAI-2000とは大きな違いが見られない。LAIのピークはLAI-2000より予測値が過大評価している。この過大評価は光合成や蒸散の過大評価の原因にもなりうる(Park et al. in submitted)。

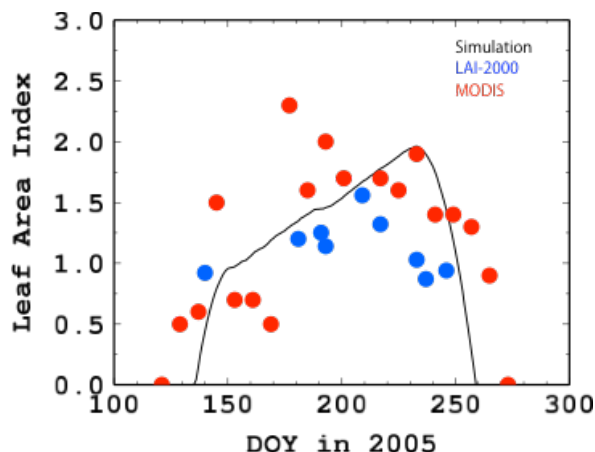


図3. 2005年のLAIの季節変化の観測値と予測値間の比較

### 3.3 CO<sub>2</sub>フラックスの観測値と計算値の比較

CO<sub>2</sub>フラックスの観測値は2004年以降有効であるため、2006年までの計算値と観測値の季節・経年変化の比較を図4で表す。モデルは3年間のCO<sub>2</sub>フラックスをよく予測したことが分かる。両者の一致は、モデルがLAIの季節変動をよく予測したことをまず証明している。特に、春先の開葉の時期における急速な炭素吸収と落葉期における呼吸による炭素のソースがよくモデリングされた。7月初旬における炭素のシンクからソースに向うその転換期もよくキャッチングされた。両者の一致は年間収支においても確認される。3年間観測による平均炭素吸収量は-171 g C m<sup>-2</sup>であり、モデル予測値は-163.8 g C m<sup>-2</sup>であった。ここで、マイナスは植物による炭素のシンクを意味する。

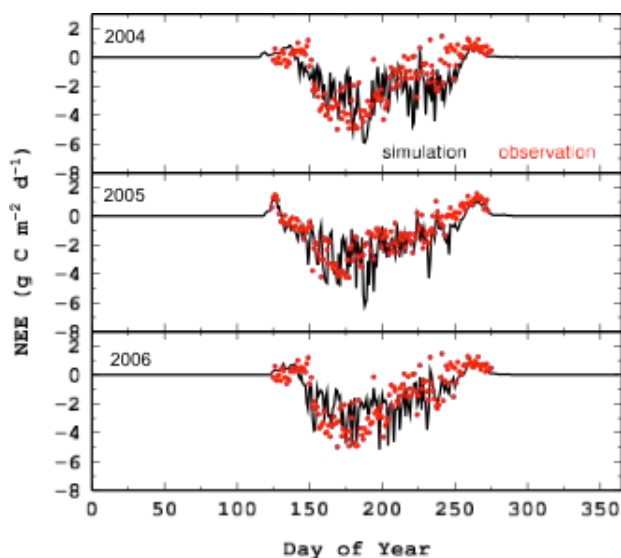


図4. CO<sub>2</sub>フラックスの季節変化の観測値と計算値の比較

年降水量の75%が夏期に集中しているが、夏は常に乾燥状態におかれている。CO<sub>2</sub>フラックスにおいても土壌水分の渇水の影響を強く受けていることが2004年と2006年のフラックスのピーク以降に見られる。この地域の蒸発散とCO<sub>2</sub>フラックスに対して土壌水分が抑制要因として働いていることが多く報告されていた。その影響によりこの地域の植物の気孔コンダクタンスは他の地域に比べて非常に低い。しかし、この地域では永久凍土が季節的に融解-凍結を繰り返している。融解時の水分は渇水を緩和する役割がある。このような環境の中での約170 g C m<sup>-2</sup>の吸収量はアラスカのblack spruceの-39 g C m<sup>-2</sup> (Ueyama et al., 2009)、カナダのblack spruceの-82 g C m<sup>-2</sup> (Frolking et al., 1996) に比べて多量であることが分かる。

### 3.4 CO<sub>2</sub>収支の経年変化

地球上のCO<sub>2</sub>濃度は産業革命以降続けて増加していた。図1で示したように気温の増加も著しい。これらの変化の中で、SPでのCO<sub>2</sub>収支に関するシミュレーション結果を図5に示す。1966年以降わずかであるが、総生産量 (gross primary production, GPP) は減少傾向にある。GPPの減少は、光合成のエネルギー源である日射量の減少 (図1) の影響であると考えられる。GPPの減少により純生産量 (net primary production, NPP) も同時減少していた。一方、土壌内の有機物の分解による呼吸量 (heterotrophic respiration, RH) は同期間逆に増加傾向にあった。その結果、NPPとRHの差である生態系純交換量 (net ecosystem exchange, NEE) は増加していた。ここで、マイナスは植物による炭層の固定を意味する。数値が大きいほど固定量が大きいことである。すなわち、NEEの増加は炭素固定量の減少を表す。

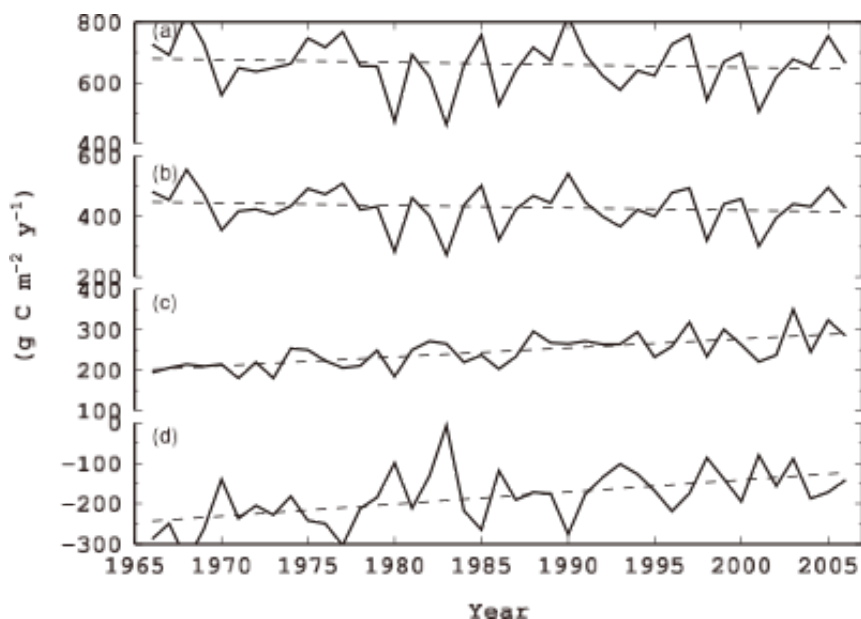


図5. CO<sub>2</sub>収支の経年変化. 総生産量 (GPP, a), 純生産量 (NPP, b), 従属栄養生物による呼吸量 (RH, c), 生態系純交換量 (NEE, d).

SPの炭素固定量の減少はNPPの減少よりRHの著しい増加の影響である。RHは地温と土壌水分の影響を強く受けている。RHの経年変化は気温と似たパターンを示している。1987年あたりで急な増加が発生していた。その後、気温と同様に一定のレベルを保っている。当サイトでの地温の長期観測では、3.2mの地温が年々増加傾向にあることが分かった。シミュレーションでも全く同様に融解深が増加トレンドにある結果が得られた。特に、2000年以降活動層の著しい増加が観測された。湿潤化も同時に進行していることが分かった (Iijima et al., 2010)。一般的にRHと地温とは正の関係にある。微生物の活動が活発になるためである。しかし、水分とRHとは負の関係であると知られていたが、本結果では、逆に両者は正の関係にあることが分かった。当サイトの年降水量は400 mm以下である。その中の75%がRHの高い夏に発生している。実際、土壌は乾燥状態にある。降

水イベントがあっても渇水を解消するほど多い量ではない。そのため、夏の降水イベントは有機物の分解を促進する。Davidson and Janssens (2006)は多くない降水はRHを増加させると報告した。Ueyama et al. (2009)はアラスカの black spruce 林における 50 年間の CO<sub>2</sub> 収支をシミュレーションして、NEE が若干減少傾向にある本研究とは異なる結果を報告した。

図 5 は CO<sub>2</sub> 収支の経年変化とそれぞれのトレンドの情報が得られるが、それぞれへの影響因子と変化の時期などの情報はなかなか得られにくい。従って、一つの例として NPP と降水量また夏の平均気温との 20 年間相関係数の時系列変動を解析した (図 6)。気温と降水量のアノマリーは 1990 年以降明らかに増加をしている。その中で、NPP と降水量は同様に 1990 年以降両者の相関が増加している。一方、気温とは 1985 年以降、相関係数の増加を表している。気温と降水量の増加は NPP の増加に明確に寄与していたが、図 6 は NPP に対して気温、あるいは降水量の影響がいつ現れたのかの情報が得られる。この結果からは、NPP の場合、1985 年以降降水量または気温増加の影響を受けていたことが明らかであった。

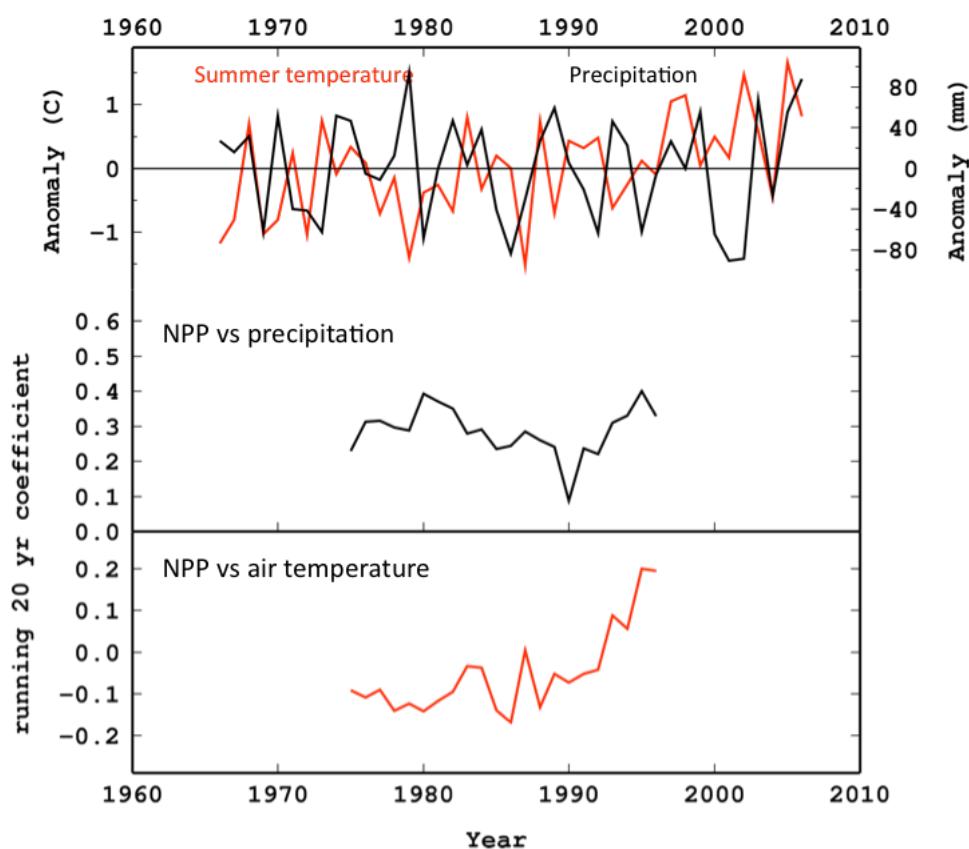


図 6. NPP と降水量及び気温との相関関係の経年変動。

#### 4. おわりに

CHANGE を 1966-2006 年を対象にして SP での CO<sub>2</sub> 収支の経年変化をシミュレートした。当期間において SP が位置するヤクーツクでは、気温は年々明らかな増加傾向を表していた。一方、降水量は若干減少傾向にあり、日射量も減少していたことが分かった。このような環境の中で、GPP と NPP とともにわずかであるが減少傾向を示した。しかし、生態系の呼吸量は増加傾向にあった。その中で、特に有機物の分解による RH の増加が著しかった。RH の増加は凍土融解の進行と深い関係があることが示唆された。これらの CO<sub>2</sub> 収支のコンポーネントは気象環境の変動に対応していることが、NPP と気温及び降水量との相関関係から分かった。NPP は 1985 年以降の気温及び降水量の増加に連動して増加が見られた。

CHANGE を流域スケールまたは北極域に広げて広域における水、熱、及び CO<sub>2</sub> 収支の変動の評価、また影響因子の抽出を今後行うべきである。

## 参考文献

- Davidson, E.A., Janssens, I.A. (2006): Temperature sensitivity of soil carbon decomposition and feedbacks to climate change. *Nature*, **440**, 165-173, doi:10.1038/nature04514.
- Dolman, A.J., Maximov, T.C., Ohata, T. (2008): Water and energy exchange in east Siberian forest: an introduction. *Agric. For. Meteorol.*, **148**, 1913-1915.
- Frolking, S. et al. (1996): Modelling temporal variability in the carbon balance of a spruce/moss boreal forest. *Global Change Biology*, **2**, 343-366.
- Iijima, Y., Fedorov, A.N., Park H., Suzuki, K., Yabuki, H., Maximov, T.C., Ohata, T. (2010): Abrupt increase in soil temperature following increased precipitation in a permafrost region, the central Lena River basin, Russia. *Permafrost and Periglacial Processes*, **21**, 30-41.
- Park, H., Iijima, Y. Yabuki, H., Ohta, T., Walsh, J., Kodama, Y., Ohata, T. (2010): Coupled hydrological and biogeochemical model (CHANGE) and modeling energy, water, and CO<sub>2</sub> exchange over a larch forest in eastern Siberia. *J. Geophys. Res.* (submitted).
- Ueyama, M., Harazono, Y., Kim, Y., Tanaka, N. (2009): Response of the carbon cycle in sub-arctic black spruce forests to climate change: Reduction of a carbon related to the sensitivity of heterotrophic respiration. *Agric. For. Meteorol.*, **149**, 582-602.

# 分布型水文モデルにおける河川の結氷日・解氷日の推定とその検証

八田 茂実

苫小牧工業高等専門学校

## 1 はじめに

シベリア地域では温暖化が最も顕著に進行すると予想され、既に気候・生態系・永久凍土などに多くの変化がおきつつある。温暖化が水循環に与える影響を把握し、過去から未来にかけてどのように変動するかを検討するには、水循環モデルの役割が重要であり、水循環の output としての河川流量との比較は水循環モデルの検証作業の重要な柱となる。一方で河川流量は、流域内に居住する人間の生活に大きな影響をあたえるため、温暖化に伴う河川流量の変化は人間への影響を図る指標の1つともなる。このため、水循環モデルの検証を行うと同時に、人間の生活に身近な時間スケールの河川流量を再現することが重要であり、週単位・日単位程度の時間分解能を有した流出量の算定が必要になると考えられる。

Ma et al.(2000)はレナ川を対象に陸面モデルと流出モデルを組み合わせた分布型水文モデルを開発し、更に Ma et al.(2002)は、提案した水文モデルに河川氷の効果を加え、日単位のハイドログラフを再現できることを示した。しかしながら、植生の影響や蒸発散、融雪などの表現が十分ではない点、試行錯誤的に設定するモデルパラメータが多いといった点で、長期間にわたる解析での適合性や他流域への展開が難しいといった問題がある。Su et al.(2005)はVICモデルを用いて月単位の河川流量の計算を行なっているが、月単位流量を対象としているため、陸面モデルの役割が大きく、流出モデルにはいずれも経験的な手法が使われている。

我々の研究グループでは Yamazaki et al.(2004)の2層モデルをベースとした陸面モデルに流出モデル、河川結氷モデルを加えた分布型水文モデルを提案し、Lena川流域の水収支や日単位流量をよく再現できることを示している (Park et al., 2008, 八田ら, 2009)。図-1 に分布型水文モデルの構成の概要を示す。分布型水文モデルによる流出量の計算結果では、Lena川の流出量は、土壌が飽和して発生した余剰水の3割程度が遅い流出成分として現れること、河川の結氷と解氷のタイミングが流出計算に大きな影響を与えることが示された (八田ら, 2009)。しかし、地中水の取り扱いが不明確であるなど課題も多く、現行のモデルをより汎用的なモデルにするためには、流出モデルと陸面モデルを結合し、遅い流出成分を便宜的にではなく物理的な意味を持った成分で表現することと、現行の河川結氷モデルの検証を行い、修正を加えていく必要がある。

本報告では、流出モデルの高度化に向けて、これまで我々のモデルで推定されてきた結氷と解氷時期の検証結果を報告する。具体的には、河川結氷モデルの検証に必要な実際の河川結氷・解氷日を推定するため、ハイドログラフ形状に注目して結氷日と解氷日を推定したうえで、これまでに行ってきた結氷・解氷モデルによる結果との比較を行った。

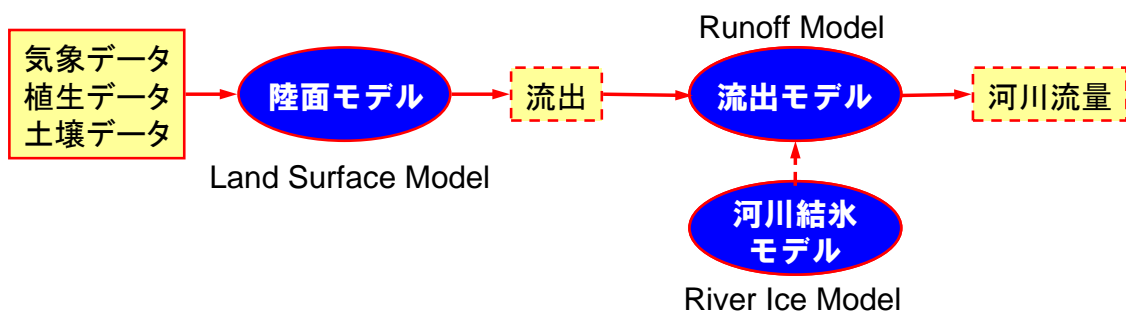


図-1 分布型水文モデルの構成

## 2 流域と観測資料の概要

レナ(Lena)川はバイカル湖北側にそびえるスタノヴォイ山脈に発し、途中主要な支川であるアルダン(Aldan)川、ヴィリュイ(Vilui)川を集めながら北極海へ流れ込んでいる。流域面積は249万km<sup>2</sup>、主河道長が4400kmの大河川である。レナ川流域は、その大半が永久凍土に覆われている点で他のシベリアの大河川と異なる。図-2に流域の概要を示す。流域内には40地点程度流量観測点が設置され、日単位の流量資料が得られている。このうち、図中に▲印で示した34地点では、流量資料に加えて1986年～1988年の冬季間、10日間おきに測定された河川氷厚の資料も得られている。図-2に流域内の流量観測点および気象観測点の配置状況をあわせて示す。この他に、2001年以降の河川水位・河川流量はArcticRIMS (<http://rims.unh.edu/index.shtml>)で公開されている資料を用いた。また、流域周辺の気象データはBaseline Meteorological Data in Siberia (BMDS) Version 4.1 (Suzuki et al., 2007)を使用した。

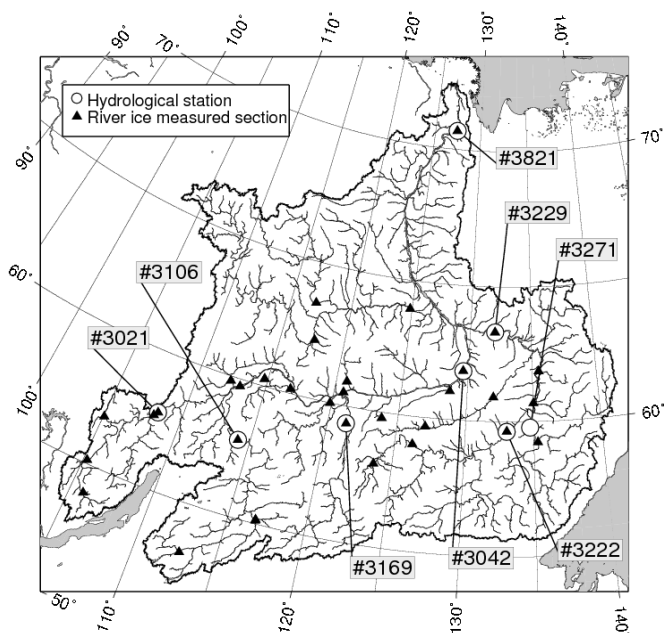


図-2 対象流域と観測地点  
(図中の○印は本報告で対象とした流量観測点、▲印は河川結氷厚の観測値にある地点)

## 3 河川流量資料を用いた河川結氷期間の抽出

### 3.1 観測水位とハイドログラフ

一般に、河川流量は連続的に測定することが困難なため、予め測定した水位と流量の関係を定めた水位流量曲線を作成し、連続的に観測した水位から河川流量を推定している。図-3はArctic RIMSで公開されている2000年から2008年の水位と流量の資料から作成したTabaga(図-2中の#3042地点)とUst-Mil(図-2中の#3222地点)の水位流量曲線の例である。図のように、Lena川の流量観測点では、2種類の曲線から構成される水位流量曲線を有する地点と、単一の曲線で流量を推定している地点が混在している。

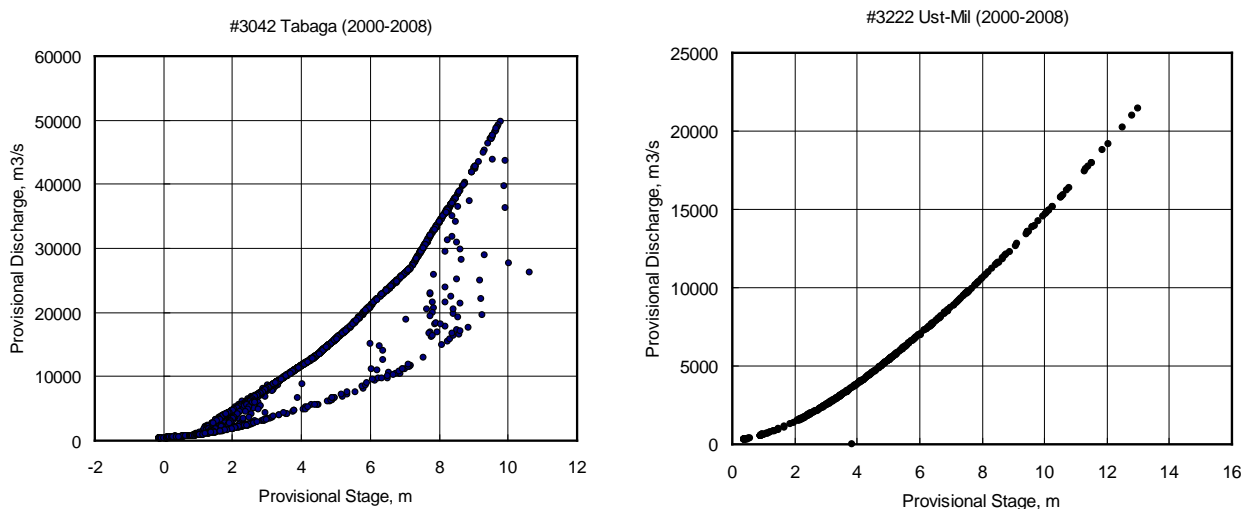


図-3 Tabaga 地点と Ust-Mil 地点の水位流量曲線(ArcticRIMSで公開されている2000年から2008年の水位と流量の資料から作成)

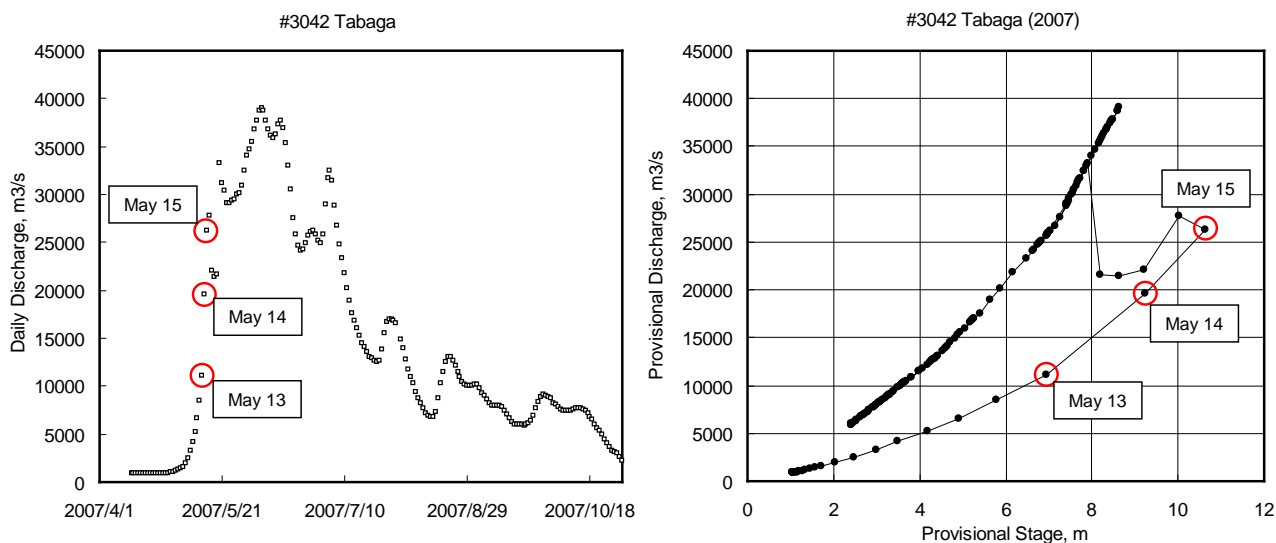


図-4 Tabaga 地点の 2007 年の水位流量曲線とハイドログラフ

2 種類の水位流量曲線を有する地点では、2 つの曲線を季節によって使い分けており、下側の曲線は春先、上側の曲線は夏季の流量の推定に用いられている。下の曲線から上の曲線へ遷移する時期やその時の水位は、各年でまちまちで、一定の基準で機械的に水位流量曲線を使い分けているわけではない。一般に結氷河川では、水面でも河川氷による摩擦抵抗が発生することから、同じ流量が流れていても水位が上昇することが報告されている。また、下流部が凍結していれば背水の影響により上流側の水位が上昇する（例えば、平山, 1985）。このため、2 本の曲線のうち、水位が大きい状態でも流量の小さい下側の曲線は結氷時の流量の推定に利用しているものと考えられる。

図-4 は、Tabaga 地点について 2007 年の資料を使って作成した水位流量曲線とハイドログラフを表したものである。2007 年の Tabaga 地点では、5 月 5 日から流量が増加し始め、5 月 15 日に最大水位を記録した後、5 月 20 日にハイドログラフに第一ピークが記録されている。Sakai et al.(2010)は、2007 年の解氷期の LANDSAT 画像から、Tabaga 地点付近のレナ川の解氷が 5 月 15 日に発生するとしている。これらのことを考え合わせると、水位流量曲線に現れる 2 本の曲線は、河川の結氷状態で完全に使い分けられており、さらに春先の洪水の最大流量は、河川解氷後に発生するものと考えられる。

一方、Ust-Mil 地点では、1986-1988 年に最大 80cm 程度まで河川氷は成長しており、河川結氷が発生しないため水位流量曲線が単一になっているわけではない。このため、単一の水位流量曲線となっている地点では、流出モデルの精度を検証する場合には注意が必要である。

### 3.2 結氷期間の推定

図-5 は 1987 年の日流量で作成した Tabaga 地点(#3042)と Ust-Mil 地点(#3222)のハイドログラフを示している。レナ川の各地点におけるハイドログラフはいずれも、春先に徐々に流量が増加し始め、その後、急激に流量が増加すること、初冬の減水曲線に折り曲げ点が現れることが特徴的である。なお、Ust-Mil 地点は前節で指摘したように水位流量曲線が単一、すなわち水位と流量は直接対応しているので、水位の変動も同じように起きていると考えてよい。図中の矢印は、1987 年に観測された解氷期の最終の河川氷厚が存在する日付とその河川氷厚、結氷が最初に観測された日付と河川氷厚をそれぞれ示している。レナ川における河川氷厚は 10 日ごとに観測されているもので、正確な結氷日・解氷日ではなく、モデルの検証に適切な資料とはいえない。実際の河川結氷は、結氷が確認された日付から 10 日以前に結氷が生じ、河川の解氷は、氷厚の最終のデータのある日から 10 日以降の間に解氷が発生したものと考えられる。このようにして、ハイドログラフの形状に注目すると、いずれの観測点に関しても、春先は氷厚データのなくなる 10 日間かそれ以降に、ハイドログラフの増水部の勾配が急変する

点、初冬には氷厚が観測される 10 日間に減水部の折れ曲げ点が含まれており、これらがそれぞれ解氷日・結氷日に対応しているものと推測される。

このようなハイドログラフの形状のうち、特に初冬の水位や流量の変動は、他の多くの結氷河川でも確認されている。Beltaos(1984)は、河川の結氷時には、河川水位が 1~5 日間をかけて一旦上昇した後、再度水位が低下していく様子を示している。吉川ら(2010)が天塩川で行った観測によれば、河川結氷直後から水位が急激に上昇し、解氷までその水位が維持される結果が示されている。Prowse and Carter(2002)はマッケンジー川で実施された結氷期の流量観測の結果から、河川結氷時には流量が一旦低下した後、元の減水曲線に沿うような形で冬季間流量が低減することを示している。河川規模も大きく異なるものの、レナ川流域の各地点において見られる初冬の減水曲線の折り曲げ点は、河川水の結氷によるものであることが推測される。一方、春先の急激な流量の増加は図-4 に示した Tabaga 地点のハイドログラフのように、解氷日の数日前から流量が増加しはじめ、最大流量にいたる期間に急激な流量の増加が起きており、この流量増加は水位流量曲線の切り替えによって発生するものではないことがわかる。Tabaga の例では、増水部の勾配急変点が現れるのは解氷日の数日前であり、実際の解氷日はその数日後と考えられるが、ハイドログラフの形状から特徴的な点を見つけることは難しい。

以上のようなことから、春先のハイドログラフ増水部の勾配が急変する日を便宜的に解氷日、減水曲線の折れ曲げ点のある日を結氷日とみなすものとした。

## 4 河川結氷モデルと適合性

### 4.1 河川結氷モデルの概要

河川水の結氷・解氷は熱的な要因・機械的な要因などが複雑に絡まっているため、気象条件はもちろん、それ以外にも河川の横断形状や縦断勾配、河川流の流速など多くの条件によって決まる。しかし、レナ川全体のスケールで、かつ、非常に少ない情報のもとで、これらをすべて考慮して流出モデルに組み込むことは困難である。このため、我々の分布型水文モデルで採用した河川結氷モデルは、第一次近似として最も簡単な気温資料のみを用いた積算暖度・積算寒度に基づくものである。詳細は別に譲るものとして(八田ら(2009))、ここではその概要を示す。なお、これらの結氷・解氷モデルは、1986年9月から1988年5月にかけて流域内の34地点で観測された河川氷厚資料に基づくもので、便宜的に春先に氷厚のデータがなくなる日を解氷日、初冬にはじめて氷厚が記録された日を結氷日として利用している。

河川水の氷厚はステファンの式に基づいて求める。ステファンの式は以下のように表される。

$$D = \kappa \sqrt{FI - FI_0} \quad (1)$$

ここで、 $D$  は河川氷厚(cm)、 $FI$  は積算寒度( $^{\circ}\text{Cday}$ )、 $FI_0$  は結氷時の積算寒度、 $\kappa$  は係数( $\text{cm}/(^{\circ}\text{Cday})^{1/2}$ )である。

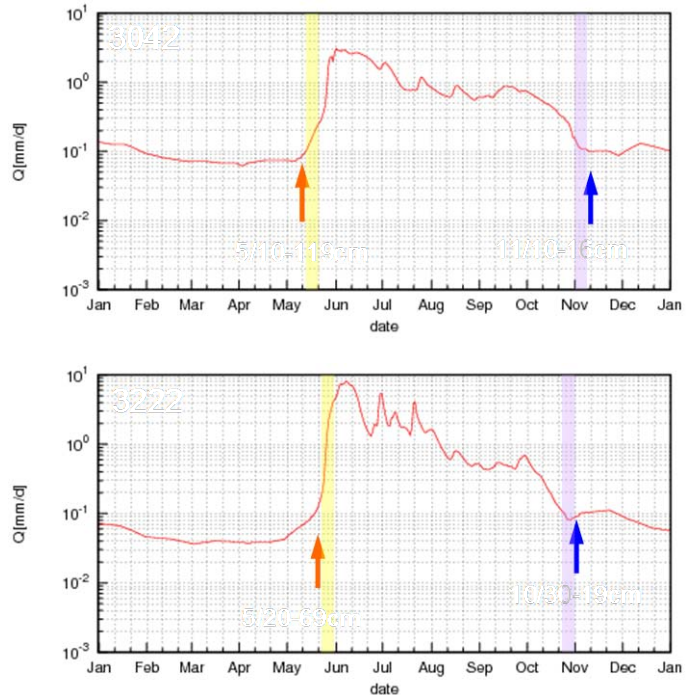


図-5 Tabaga(#3042)地点と Ust-Mil(#3222)地点のハイドログラフと河川結氷資料の最終日と出現日(1987年)



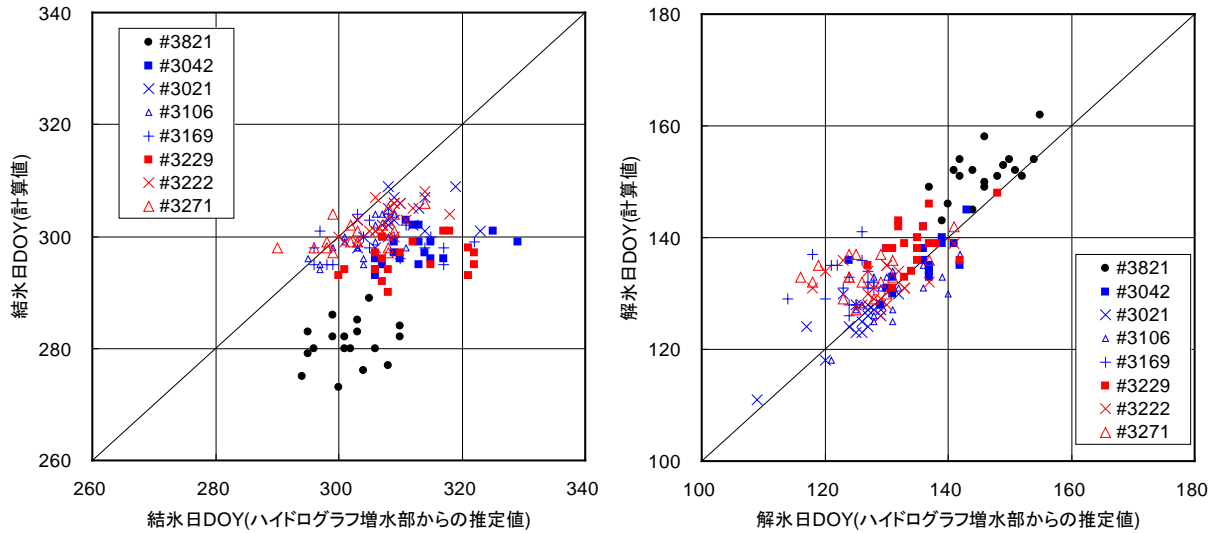


図-6 流量観測点における河川結氷日と解氷日の計算値とハイドログラフからの推定値との比較(1987年～2003年；流量観測地点は図-1中に表示)

係数  $\kappa$  は理論的には、 $3.48\text{cm}/(^{\circ}\text{Cday})^{1/2}$  の値となる。 $\kappa$  の値は積雪に覆われた河川氷では1.4～1.7程度の値をとることが知られている(Beltaos, 1995)。1986年～88年に観測された河川氷厚と結氷後の積算寒度の関係を求めたところ、全観測点・全期間で係数 $\kappa$ は理論値を下回り、平均値は $1.65\text{cm}/(^{\circ}\text{Cday})^{1/2}$  が得られた。この値は、文献値と比較しても妥当な値で、 $\kappa$ にはこの値を採用することとした。また、上式を用いて結氷厚を計算するには $FI_0$ を定める必要があるが、モデルでは、全観測点の結氷開始日の積算寒度の平均値 $112.7(^{\circ}\text{Cday})$ を用いた。

一方、河川氷の解氷日は、解氷時の積算暖度の閾値を最大河川氷厚によって定め、積算暖度がこの閾値を越えた場合に、解氷するものとした。解氷日の積算暖度の閾値は次式のように定めた。

$$\sqrt{MI_0} = bD_{max} \quad (2)$$

ここで、 $MI_0$ は解氷日の積算暖度、 $D_{max}$ は最大結氷厚(cm)、 $b$ は係数で、モデルでは観測資料の平均値0.037を採用した。

#### 4.2 結氷-解氷モデルによる結氷日・解氷日の推定結果

図-6は、図-1に示した8箇所の流量観測点について、4.1節で示した河川結氷モデルで求めた結氷日・解氷日と、3.2節に示した方法でハイドログラフの形状から推定した結氷日・解氷日と比較したものである。結氷日に関しては、計算値とハイドログラフからの推定日のずれが大きく、特に#3821地点、#3042地点、#3229地点でハイドログラフからの推定値に対して10日～30日程度早く計算されている。これは、結氷日開始の積算寒度を便宜的に全地点の平均値で与えているため、結氷の生じにくい流量・河道断面がともに大きい#3821、#3042、#3229といった地点で結氷日が早く推定された結果と考えられる。一方、解氷日については、いずれの地点ともハイドログラフからの推定日に対して、平均して7日程度遅めに解氷と判定されているものの、結氷日に比べてかなりよく一致している。ただし、ハイドログラフによる解氷の推定日は、実際の解氷日より数日早く推定されている可能性があるため、モデルによる計算解氷日はさらによく一致しているとも考えられる。解氷モデルは最大結氷厚の計算値に依存するため、今後結氷日の計算値が現在よりも遅く計算されるようになれば、冬期間の積算寒度は小さくなり、解氷日は現在の計算結果よりも早めに計算されることになる。このため、今回ハイドログラフから推定された結氷日を参考に、結氷のモデル修正することにより、結氷と解氷の精度が同時に向上することが期待できる。

## 5 おわりに

本報告では、流出モデルの高度化に向けて、現状の河川結氷モデルの性能を評価した結果を示した。具体的には、まず、河川結氷モデルの検証に必要な実際の河川結氷・解氷日を推定するため、ハイドログラフ形状に注目して結氷日と解氷日を推定したうえで、これまでに行ってきた結氷・解氷モデルによる結果との比較を行った。この結果、結氷日は特に河道幅が大きい地点で10日~30日程度早く計算されていること、解氷日については7日程度遅めに計算されて入るものの、全体としてはよく一致していることが確認された。河川結氷モデルについては、結氷日の推定部を改良することで、結氷日・解氷日の推定精度の向上が期待できる。このため、今後は基本的に現モデルを踏襲しながら、結氷日の推定精度を向上させる予定である。また、今回報告するに至らなかったが、現在、陸面モデルで計算される土壌深度別の流出量や土壌凍結を考慮し、流出過程を再度モデル化する作業を進めている。今後は、河川結氷モデルの改良と地中成分のモデル化を行い、より現実的な流出計算を行い、G3へ時間的・空間的な河川流量を提供し、洪水解析などの利用に資する予定である。

## 参考文献

- Beltaos, S. 1984. A conceptual model of river ice break up, *Can. J. Civ. Eng.*, **11**,516-529.
- Beltaos S. 1995. River Ice Jams, Water Resources Publications: LLC; 48-49.
- 八田茂実・早川博・朴昊澤・山崎剛・山本一清・太田岳史 分布型水文モデルによるレナ川流域の長期流出解析 水  
文・水資源学会誌, **22**, 177-187, 2009.
- 平山健一：河川の結氷過程とそのモデル化, *水理講演会論文集*, **29**, 179-184.
- Ma X, Fukushima Y. 2002. A numerical model of the river freezing process and its application to the Lena River, *Hydrological Processes* **16**: 2131-2140.
- Ma X, Fukushima Y, Hiyama T, Hashimoto T, Ohata T. 2000. A macro-scale hydrological analysis of the Lena River basin, *Hydrological Processes* **14**: 639-651.
- Park H, Yamazaki T, Yamamoto K, Ohta T. 2008. Tempo-spatial characteristics of energy budget and evapotranspiration in Eastern Siberia, *Agricultural and Forest Meteorology*, **148**, 1990-2005.
- Prowse T D, Carter T. 2002. Significance ice-induced storage to spring runoff: a case study of the Mackenzie River, *Hydrological Processes* **16**. 779-788.
- Sakai T, Hatta S, Okumura M, Takeuchi W, Hiyama T, Inoue G. 2010. A time-series analysis of flood disaster around Lena river using Landsat TM/ETM+, *EGU General Assembly* 2010.
- Su F, Adam J, Bowling L, Lettenmaier D. 2005. Streamflow simulations of the terrestrial Arctic domain, *J. Geophys. Res.*, **110**, D08112, doi:10.1029/2004JD005518.
- Suzuki R, Razuvaev VN, Bulygina ON, Ohata T. 2007. Baseline Meteorological Data in Siberia Version 4.1, Institute of Observational Research for Global Change, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, Yokosuka, Japan.
- Yamazaki T, Yabuki H, Ishii Y, Ohta T, Ohata T. 2004. Water and energy exchanges at forests and a grassland in eastern Siberia evaluated using one-dimensional land surface model, *Journal of Hydrometeorology*, **5**: 204--515.
- 吉川泰弘・渡邊康玄・早川博・平井康幸：寒地河川における河氷変動が河川水位へ与える影響, *土木学会北海道支部論文報告集*, **66**, B-3, 2010.

# 衛星画像によるヤクーツク周辺の森林変化域判読結果の検討

山本 一清

名古屋大学大学院 生命農学研究科

## 1 はじめに

シベリアの北方森林域における森林変化については、現地における十分な情報が得られず、広域的な現状把握は困難である。そのため、衛星画像を利用し、森林変化や土地利用変化を対象とした広域解析が行われてきた。しかし、北方森林域における森林変化の原因としては、森林火災がその主要な要因として、火災現象の把握やその後の回復過程の把握について多くの研究がなされてきた(George *et al.*, 2006; Cuevas-González *et al.* 2009)。しかし、近年気候変動にともなう様々な環境要因の変化も報告されており(太田ら 2009)、これまでのような火災等の特定の既知要因及び情報に基づいた解析だけでなく、原因が既知ではない現象の時空間的な把握とその分析から、その地域で生じている現象の規模や原因の変遷について把握することにより、気候変動等の様々な環境変化が北方森林域に与えている影響の解明に寄与できるものと考えられる、以上のことから、本節は、シベリア(ロシア)、特にヤクーツク周辺を対象として、中分解能衛星画像を利用した目視判読による森林変化の時空間的把握、及びその分析をによる変化域抽出方法の検討を行った。さらに、その結果により対象域の森林変化域の時空間推定を行い、その原因、特に森林火災との関係について検討を行った。

## 2 対象地域及び使用データ

シベリアのヤクーツクのタワーサイト周辺域(東経 122 度~136 度、北緯 59 度~64 度)を対象として、以下のデータを使用した。

(1) ASTER 画像 (産業技術総合研究所: Global Earth Observation Grid (GEO Grid))

ASTER  $\beta$  ブラウズ画像 (緯度・経度座標系: 約 15m 解像度)

(2) MODIS 衛星画像 (Land Processes Distributed Active Archive Center (LP DAAC))

MOD13Q1: Terra Vegetation Indices 16-day Composite (Sinusoidal Projection: 約 250m 解像度)

MOD14A2: Terra Thermal Anomalies & Fire 8-day Composite (Sinusoidal Projection: 約 1km 解像度)

## 3 解析方法

(1) ASTER  $\beta$  ブラウズ画像及び MODIS 画像による森林変化域の目視判読

ヤクーツク周辺以北のシベリア地域における森林変化域について、十分な精度及び広域性を持った現地データを取得することは時間的にも労力的にも、また政治的な問題も含め極めて困難である。また、航空写真や高分解能(空間スケール 1m 程度)衛星画像の入手も困難であるた

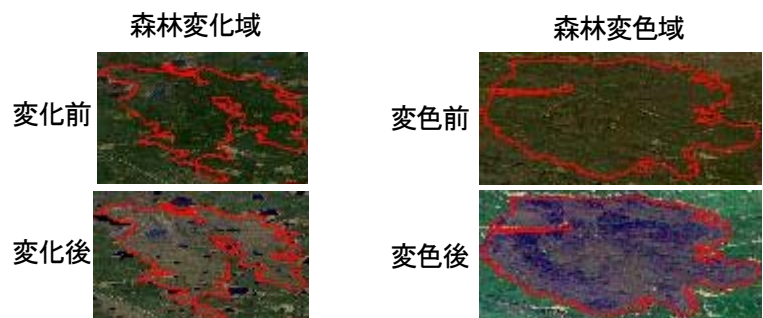


図-1. 変化域及び変色域

め、今回は中分解能衛星画像である ASTER 画像のブラウザ画像（空間スケール 15m 程度）を利用した。まず、全ての取得した ASTER 画像を GIS 上にインポートし、同一年の画像を各年で 1 枚の画像に合成し、目視により年の異なる 2 時期間で森林域から非森林域に変化した区域の境界（森林変化域ポリゴン）を GIS 上でデジタル化し、森林変化域データ（ベクトルデータ）を作成した。なお、単年の画像上に見られた森林域内の変色域（図-1）についても、合わせて森林変化域データに加えた。

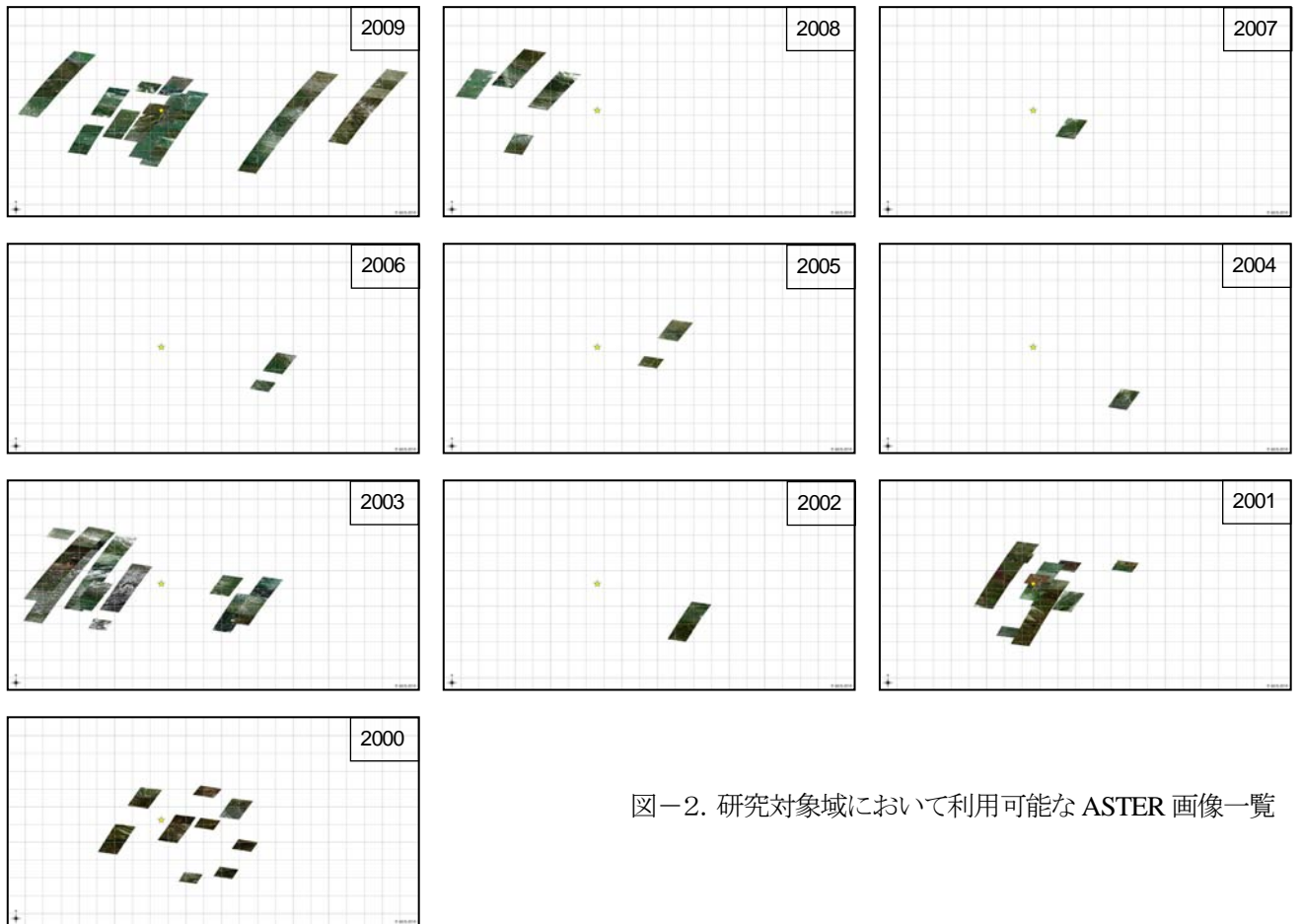


図-2. 研究対象域において利用可能な ASTER 画像一覧

ここで、対象地域で利用できた ASTER 画像は、図-2 にあるように限られており、連続した年度間での比較が不可能であったため、森林変化域における変化時期（年）は ASTER 画像のみでは特定できなかった。そのため、森林変化域内で無作為に数点の解析ポイントを設定し、MODIS 衛星画像(MOD13Q1)に含まれる NDVI 画像（以後 MODIS NDVI 画像とする）から解析ポイントにおける時系列データ（図-3）を抽出し、その時系列データ上に現れた変化時期（年）を森林変化年とし、森林変化域データ（ベクトルデータ）の属性データとして変化年を追加した。なお、変化年の特定の条件は、変化年の前後で NDVI 年間最大値が明確な変化（減少）を示した場合とし、変化（減少）した年を森林変化年とした。

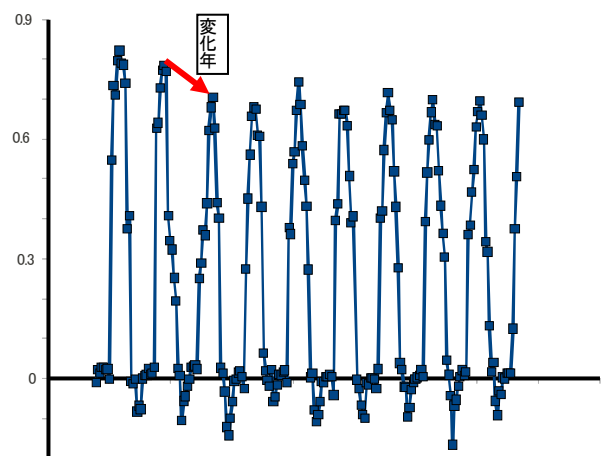


図-3. 変化年の判定

## (2) MODIS 衛星画像による森林変化域の抽出条件

MODIS 衛星画像による森林変化域の抽出条件を明らかにするため、(1)で作成した森林変化域データ（ベクトルデータ）を利用し、以下の手法により解析を行った。

まず、MODIS NDVI 画像（250m解像度）の時系列データから、各ピクセル毎に各年の NDVI 最大値を算出し、各年の NDVI 最大値画像を作成した。次に、(1)で作成した森林変化域データ（ベクトルデータ）により、森林変化域内の全ピクセルを対象に、森林変化年を基準として、前々年～翌年までの期間について各年の NDVI 最大値を抽出した。さらに、森林変化域における森林状態と非森林状態の NDVI 最大値の差異を検討するため、抽出した各年の NDVI 最大値から、森林変化年及びその前年の NDVI 最大値の分布を比較した。また、森林変化にともなう NDVI 最大値の変化量を検討するため、森林変化年を基準年として、前々年・前年間、前年・森林変化年間、森林変化年・翌年間について、それぞれの期間における NDVI 最大値の変化量を算出し、同様にその分布を比較した。最後に、これらの比較結果から、森林変化域及びその変化年の推定を行うための条件（森林変化抽出条件）を検討した。

## (3) 森林変化抽出条件の評価及びその原因評価

森林変化抽出条件の評価及びその原因評価のため、まず(2)で得られた森林変化抽出条件により、各年の NDVI 最大値画像から森林変化域及びその変化年の推定を行った。次に、その推定結果と(1)で作成した森林変化域データ（ベクトルデータ）との比較により、森林変化抽出条件の妥当性を検討した。さらに、同様に MODIS Thermal Anomalies & Fire(Giglio *et al.*, 2003)プロダクトによる火災判定結果との比較により、森林変化の原因が火災によるものか、或いはそれ以外の原因も存在するのかについて検討を行った。

## 4 結果及び考察

判読により得られた森林変化域データ（ベクトルデータ）から算出した、森林変化年及び森林変化域ポリゴン面積の頻度分布（図-4）から、森林変化年では 2003 年及び 2009 年に高い頻度で森林変化が生じており、面積的には多くが 100km<sup>2</sup>未満の規模であった。

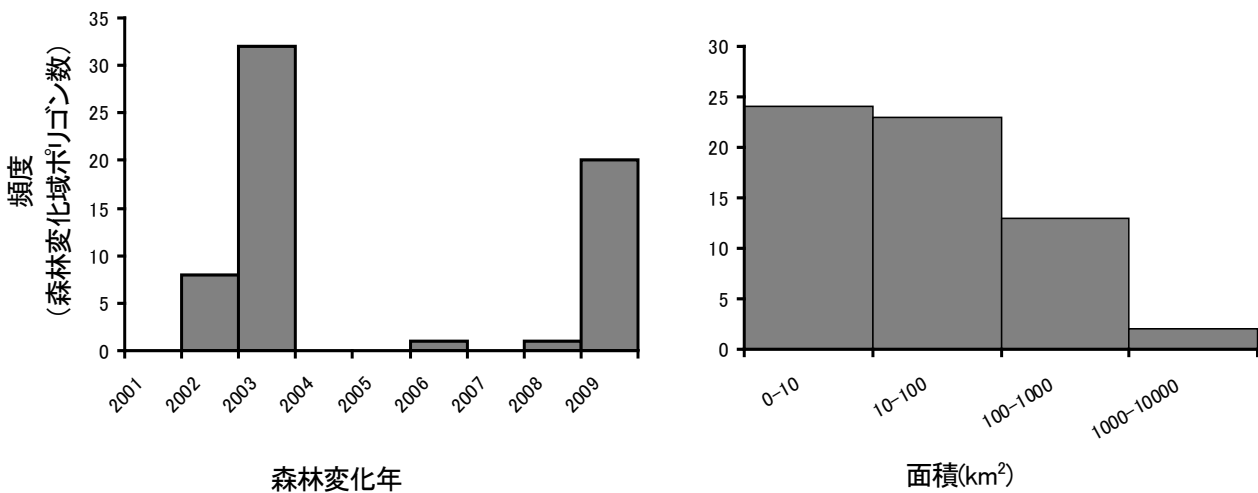


図-4. 森林変化域判読結果

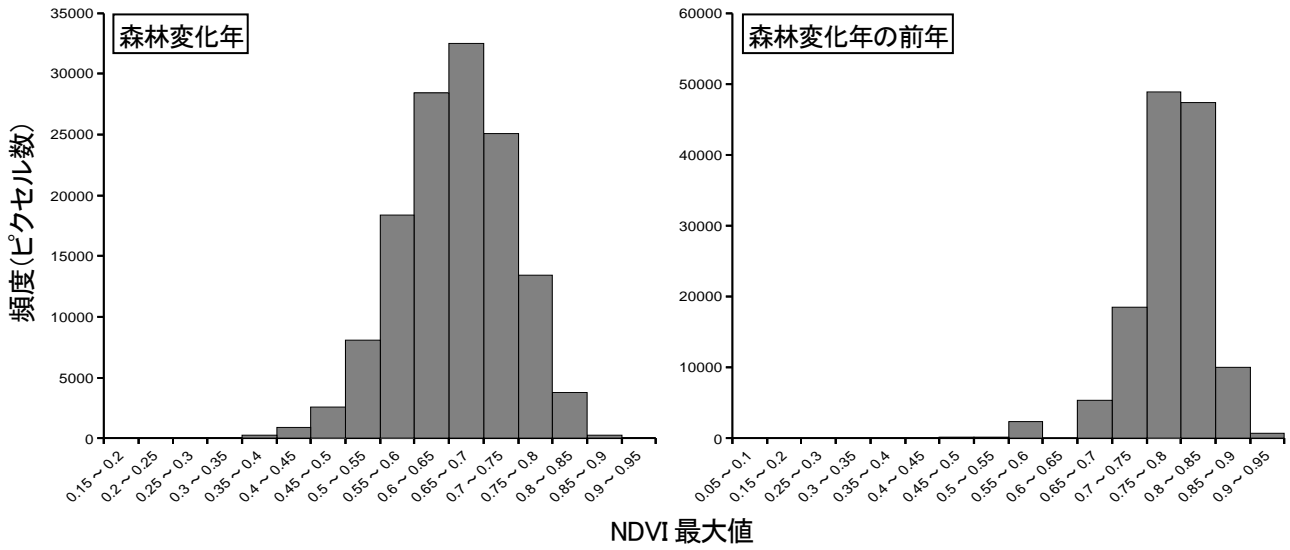


図-5. 森林変化年及び前年における森林変化域内の NDVI 最大値の頻度分布

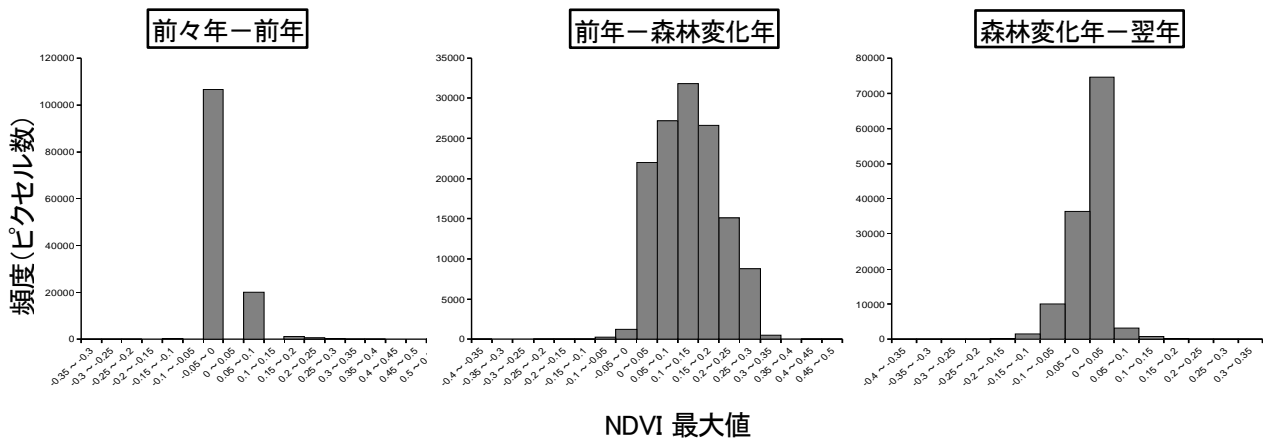


図-6. 森林変化年及びその前後期間における森林変化域内の NDVI 最大値変化量の頻度分布

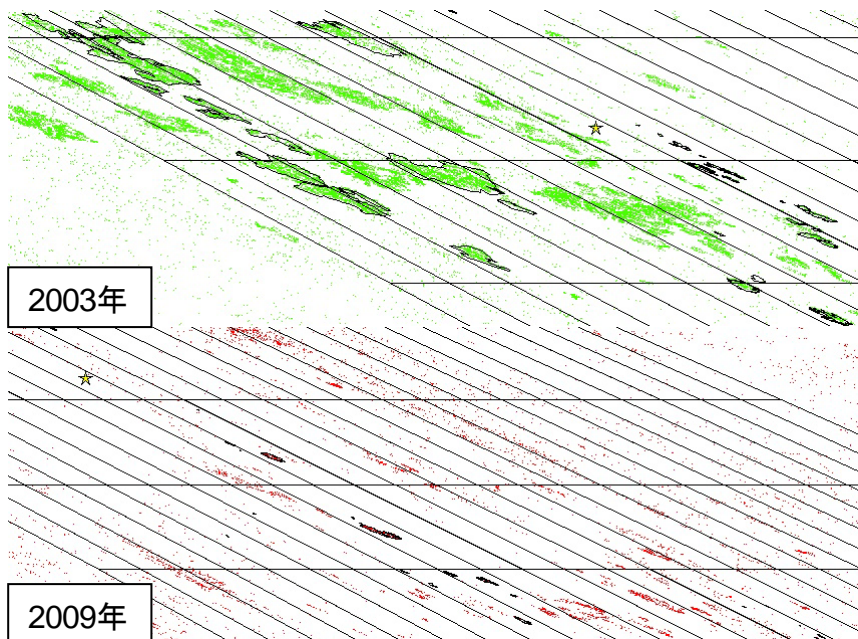


図-7. 推定森林変化域と判読結果の比較(黒枠が判読結果、背景の緑及び赤色部分が推定森林変化域)

一方、森林変化年とその前年のNDVI最大値の頻度(図-5)では、前年のNDVI最大値が0.75~0.80の範囲にピークを持つ分布を呈しているのに対し、森林変化年では0.65~0.70の範囲にピークを持つ分布呈しており、森林変化前後で0.1程度分布のピークが低かった。また、NDVI最大値の変化量(図-6)については、前々年・前年間及び森林変化年・翌年間では±0.1付近に集中しているのに対し、前年・森林変化年間では0.10~0.15にピークを持つ分布を呈し、そのほとんどが0以上の範囲に分布していた。

以上のことから、森林変化抽出条件として以下の2つの条件:

条件1:(前年のNDVI最大値) > 0.7

条件2:(前年のNDVI最大値-当年のNDVI最大値) > 0.1

を設定し、両条件を満たすエリアを当年における森林変化域として抽出した結果(図-7)、ほぼ目視判読の結果に近い抽出結果となった。上記の条件により森林変化域ポリゴンを完全に再現できているわけではないが、さらに抽出結果の詳細な分析を行うことにより、より再現性の高い条件設定を見出せるものと考えられる。

また、森林変化域データ(ベクトルデータ)とMODIS衛星画像(MOD14A2)のThermal Anomalies & Fire画像に含まれるFire mask画像(以後MODIS Fire画像とする)の比較結果(図-8)が示すように、ほぼ全ての森林変化域ポリゴンにおいて、森林変化年の前年にポリゴン内に火災エリアが存在することから、今回対象とした地域における森林変化の原因のほとんどが森林火災であることが推察された。

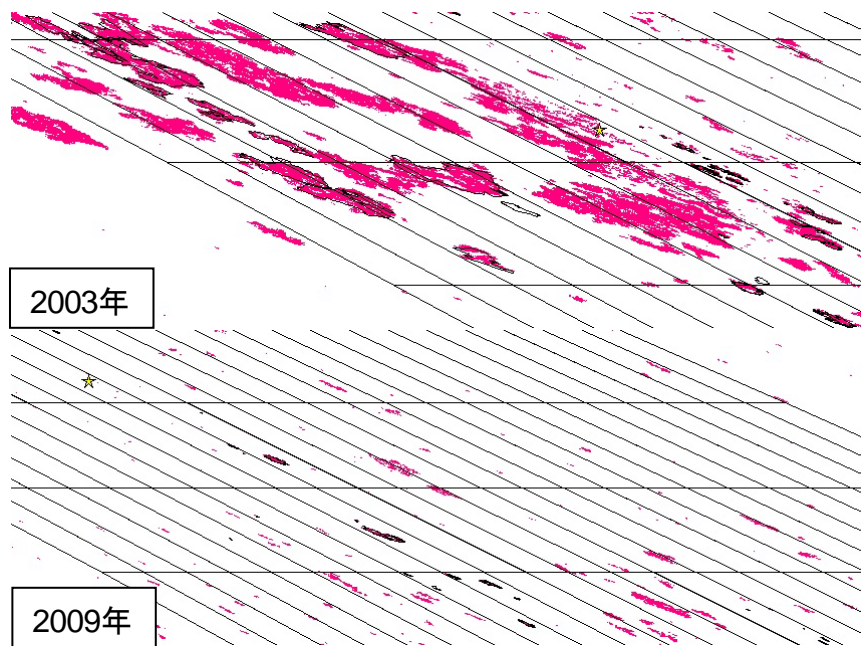


図-8. 判読結果(黒枠)とMODIS Fire maskの比較

## 参考文献

- 太田岳史・小谷亜由美・中井太郎・Maximov, TC. (2009) 長期の過湿状態による東シベリア・タイガ林へのダメージ 日本森林学会大会発表データベース **120**:221
- Giglio, L., Descloitres, J., Justice, C. O., and Kaufman, Y. (2003) An enhanced contextual fire detection algorithm for MODIS. *Remote Sensing of Environment* **87**:273-282.
- Cuevas-González M, Gerard F, Balzter H, Riaño, D. (2009) Analysing forest recovery after wildfire disturbance in boreal Siberia using remotely sensed vegetation indices. *Global Change Biology* **15**: 561-577.
- George C, Rowland C, Gerard F, Balzter H (2006) Retrospective mapping of burnt areas in Central Siberia using a modification of the Normalised Difference Water Index. *Remote Sensing of Environment*. **104**, 346-359.

# 東シベリアにおける地表面改変が水・熱循環に与える影響

吉田 龍平

東北大学大学院 理学研究科 地球物理学専攻

## 1 はじめに

GCMのマルチモデル平均によると、シベリアは将来地表面気温の増加分が他地域と比較して特に大きいところと予測されている (Solomon, *et al.*, 2007)。また、地表面蒸発量、降水量の増加も予測されており、地表面状態の変化が大気側にも変化を与えていると考えられる。すでに発生している地表面の変化として、森林火災の増加に伴う森林面積の減少 (Potapov, *et al.*, 2008) や、アラス湖に代表される水体面積の拡大が報告されている (Iijima, *et al.*, 2010)。これら地表面の変化に伴い、地表面を決定付けるパラメータが変化する。森林から草地に変化する場合、アルベドは 0.06 増加し、蒸発効率は 0.1 増加する (近藤, 1994)。また、草地からの水体化ではアルベドは 0.09 の減少、蒸発効率は 0.7 増加する。これら地表面パラメータの変化に伴い、熱収支構成要素が変化する。構成要素の 1 つである潜熱フラックスは陸面から大気への水蒸気供給をもたらす要素である。同位体解析の結果によると、シベリアにおける陸面蒸発散の降水へ与える影響は東ほど大きい (Kurita, *et al.*, 2004)。したがって、地表面改変に伴う地表面パラメータの変化を通じた潜熱フラックス、降水量の変動は東シベリアで大きくなることが示唆される。

これまで東シベリアにおいて地表面改変に伴う水・熱収支の変化を定量的に議論した研究例はなく、数値モデルによる感度実験が有用な手法である。これまでも数値モデル研究が東シベリアを対象として行われてきたが (Yamazaki, *et al.*, 2007; Park, *et al.*, 2008)、これらは 1 次元陸面過程モデルを点スケールで適用あるいは各点に適用したものであり、陸面蒸発散の増加/減少に伴う大気中水蒸気の増加/減少、雲量の増加/減少、下向き日射量の減少/増加といった大気陸面相互作用は含まれていない。したがって本研究では、大気陸面相互作用を扱える 3 次元大気モデルを用いて東シベリアにおける熱収支構成要素を規定する要因を明らかにし、それらの結果に基づいて地表面改変に伴う潜熱フラックスの応答を明らかにする。

## 2 実験設定

使用したモデルは気象庁、気象研究所で共同開発された非静力学モデル JMA-NHM である (Saito, *et al.*, 2006)。本研究では、熱収支構成要素を規定する要因を明らかにする数値実験をパラメータ感度実験、地表面改変に伴う潜熱フラックスの応答を議論する実験を地表面改変実験と呼ぶ。パラメータ感度実験、地表面改変実験のどちらにおいても初期値・境界値には JRA-25 再解析データ (Onogi, *et al.*, 2007) を用いた。計算領域は図 1 に示すように北緯 66 度 0 分、東経 126 度 30 分を中心として東西・南北に 4200km をとり (格子間隔 30km)、その計算結果を新たな初期値・境界値として 2000km 四方へとダウンスケールを行った (格子間隔 5km)。対流パラメータリゼーションは Kain-Fritsch スキーム (Kain, 2004; Kain and Fritsch, 1990) と雲物理過程を用い、乱流過程には Improved Mellor-Yamada Level 3 (Nakanishi and Niino, 2004) を用いた。計算期間は Baseline Meteorological Data in Siberia version 4 (Suzuki, *et al.*, 2006) の降水量を利用し、6,7,8 月における 1986 年から 2004 年の 10 日移動平均値の平均を算出し、最も平均に近い 10 日間である 2000 年 7 月 7 日から 17 日までの 10 日間とした。また、計算開始 1 日目はスピンアップ期間として除外し、残りの 10 日間を解析に使用した。

近年報告されている水体面積の拡大、森林火災の増加は低地を中心にして起こっている。Global Land Cover Characterization (GLCC) のデータセットによると、水体は主に標高が 250m 以下の部分に位置している。後半で地表面改変実験について議論することを考慮し、パラメータ感度実験、地表面改変実験のいずれの実験においても陸面パラメータの変化は標高 250m 以下の低地に対して行い、250m より高い部分に関しては GLCC で提供されている土地利用分布に基づく地表面パラメータを常に使用する。また、地表面改変実験においては、アラスと呼ばれる草地と水体は中央シベリア低地の 18% を占めることを考慮し (Lopez,



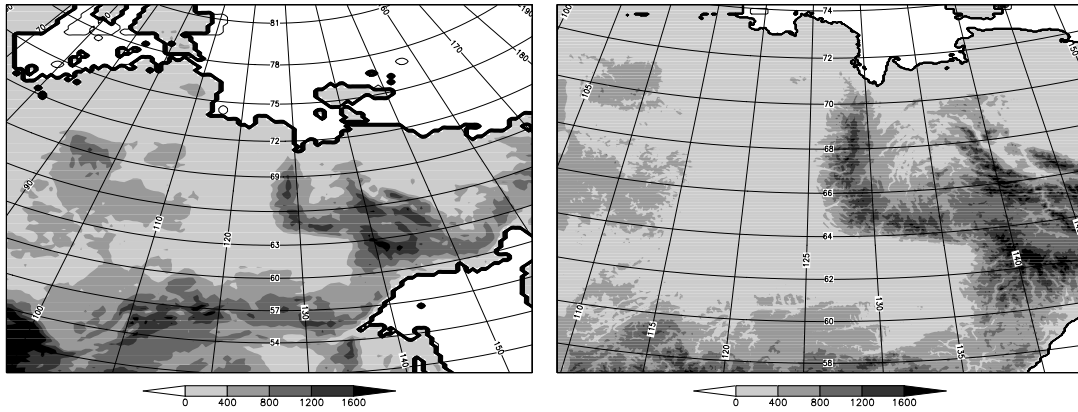


図1 領域設定

左, 格子間隔 30km、141 格子; 右, 格子間隔 5km、401 格子。

et al., 2008)、先に挙げた低地の各グリッドに対して 0 から 1 の乱数を発生させ、0 から 0.2 として与えられたグリッドに対して草地あるいは水体の地表面パラメータを設定する。蒸発効率分布の例を図 2 に示す。

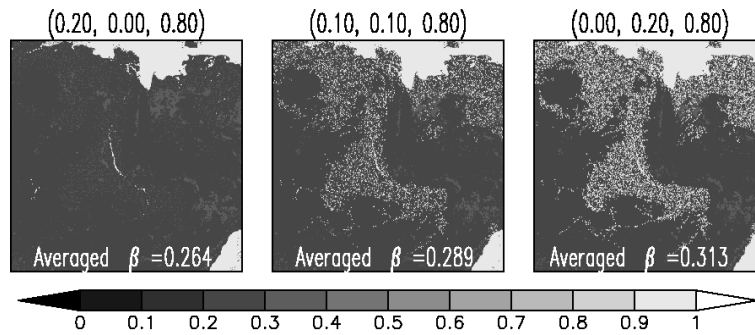


図2 水体拡大実験実験設定

それぞれの数値は低地に占める陸面比を表す。左から順に草地、水体、その他(森林、低草、その他)の割合である。その他の分布は Global Land Cover Characterization の土地利用分布に基づく。

### 3 結果と考察

#### 3.1 パラメータ感度実験

図 3 は各地表面パラメータの変化に対する領域平均した潜熱フラックスの応答を示している。レナ流域の潜熱フラックスは地表面アルベドと蒸発効率の変化に対して敏感に応答し、一方で地表面粗度、熱容量と熱伝導率に対して弱い応答を示した。大きな変化を示した地表面アルベドと蒸発効率に対して熱収支の立場から解析すると、これら 2 つの地表面パラメータは異なるメカニズムによって潜熱フラックスへ影響を与えていることが明らかになった。地表面アルベドの 0.0 から 0.8 への増加に伴い、地表面へ入射する正味放射量は  $34.5 \text{ W m}^{-2}$  減少した。正味放射量の減少は潜熱フラックス、顕熱フラックス両方の減少をもたらした。潜熱フラックスは  $18.4 \text{ W m}^{-2}$  の減少、顕熱フラックスは  $18.1 \text{ W m}^{-2}$  減少した。潜熱フラックスの減少に伴って大気中に含まれる水蒸気量が減少し、雲量の減少、下向き短波放射量の増加が起こった。下向き短波放射量の増加分は  $29.3 \text{ W m}^{-2}$  であった。下向き日射量の増加は正味放射量を増加させる方向へ働くが、アルベド増加による正味放射量減少の効果の方が大きく、全体としては正味放射量は減少した。一方で、蒸発効率の 0.0 から 1.0 への増加は潜熱フラックスの直接増加 ( $29.8 \text{ W m}^{-2}$ ) を引き起こした。こちらは正味放射量の変動幅は小さく ( $5.8 \text{ W m}^{-2}$  の増加)、顕熱フラックスは  $24.9 \text{ W m}^{-2}$  の減少であった。

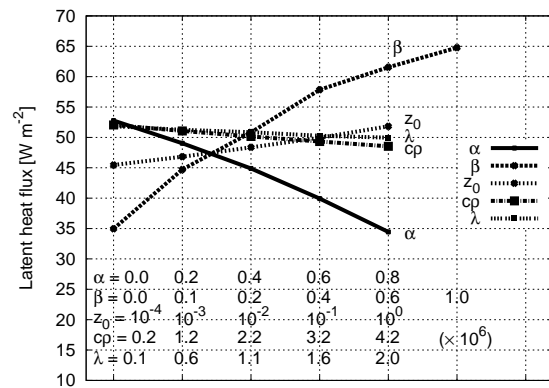


図3 地表面パラメータに対する領域平均潜熱フラックスの応答 [ $\text{W m}^{-2}$ ]

$\alpha$  は地表面アルベド、 $\beta$  は蒸発効率、 $z_0$  は地表面粗度、 $c_p$  は熱容量、 $\lambda$  は熱伝導率を表す

したがって、レナ流域の潜熱フラックスに大きな影響を持つパラメータは地表面アルベドと蒸発効率の2つであり、それぞれは異なるメカニズムによって潜熱フラックスへ影響を与えていることが明らかになった。

### 3.2 地表面改変実験

図4は標高250m以下の低地のうち、草地の占める割合が20%である場合と水体が20%である場合の潜熱フラックス、およびその2つの差を示している。アラス候補として判定されたグリッドの部分がパッチ状に潜熱フラックスが増加していることが確認できる。また、南へ行くほど大きな潜熱フラックスへ変化していることがわかる。南の低地中央部において潜熱フラックスが周囲と比較して小さい領域が存在するが、これは基準実験において降水が発生している領域であり、下向き短波放射量が小さく正味放射量が小さいことが原因である。

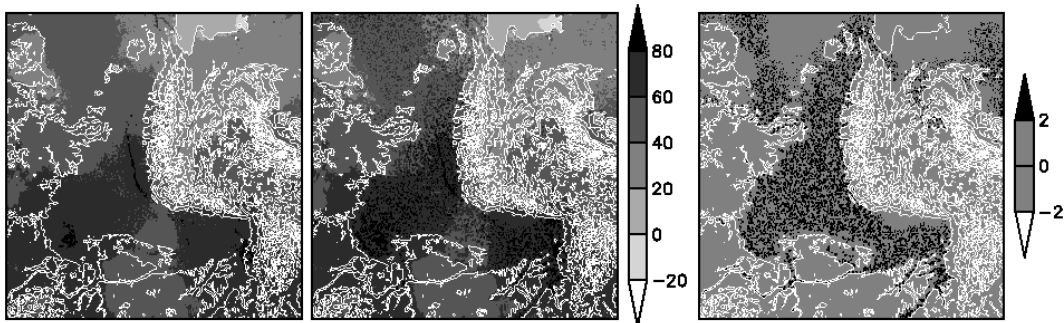


図4 水体拡大に伴う潜熱フラックスの応答 [ $\text{W m}^{-2}$ ]

左,(草地、水体、その他)=(0.2, 0.0, 0.8); 中, 同 (0.0, 0.2, 0.8); 右, (0.0, 0.2, 0.8) - (0.2, 0.0, 0.8)

図5は5km格子の領域内で平均した、各地表面分布に対する潜熱フラックスの応答を表している。いずれの乱数パターンに対しても、草地から水体化において潜熱フラックスは線形の上昇トレンドを示した。各地表面パターンで平均した潜熱フラックスの増分は  $1.2 \text{ W m}^{-2}$  で、(草地、水体、その他)=(0.2, 0.0, 0.8) 時の潜熱フラックス  $50.7 \text{ W m}^{-2}$  に対して2.4%の増加であった。この増加が起こった要因を明らかにするため、パラメータ感度実験の結果を用いて、水体拡大に伴う各地表面パラメータの影響を評価した。潜熱フラックスの変化分  $\Delta \text{LE}$  は各パラメータの変化 ( $\Delta \text{para}$ ) に対して線形に応答すると仮定すると、次式が書

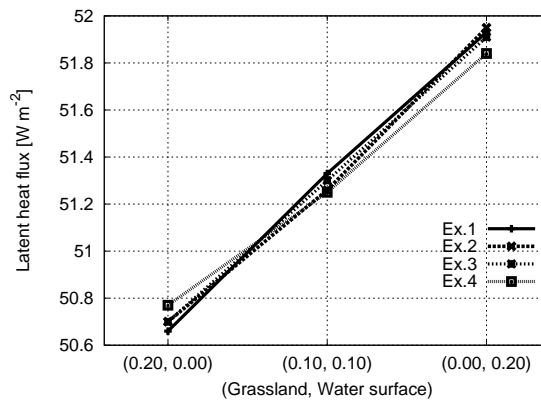


図5 水体拡大に伴う領域平均潜熱フラックスの応答 [ $W m^{-2}$ ]

各 Ex. は使用する乱数パターンの違いを表す。

ける。

$$\Delta LE = \frac{\partial LE}{\partial \alpha} \Delta \alpha + \frac{\partial LE}{\partial \beta} \Delta \beta + \frac{\partial LE}{\partial \log z_0} \Delta \log z_0 + \frac{\partial LE}{\partial c_p} \Delta c_p + \frac{\partial LE}{\partial \lambda} \Delta \lambda \quad (1)$$

ここで  $\partial LE / \partial para$  ( $para$  はアルベド、蒸発効率、地表面粗度、熱容量、熱伝導率) をパラメータ影響度と定義する。パラメータ影響度は先のパラメータ感度実験から既知であり、パラメータ増分の  $\Delta para$  は地表面の土地利用データから算出できる。これらのデータに基づき、(草地、水体、その他)=(0.2、0.0、0.8) から (0.0、0.2、0.8) への変化に対する (1) 式を計算すると次式が得られる。

$$\begin{aligned} \Delta LE &= -22.9 \times (-0.006) + 29.8 \times (0.049) + 1.59 \times (-5.81 \times 10^4) \\ &\quad + (-0.88 \times 10^{-6}) \times 0.027 \times 10^6 + (-1.0) \times 0.115 \\ &= +0.137 + 1.46 - 9.24 \times 10^{-4} - 0.0238 - 0.115 \\ &= 1.46 \end{aligned}$$

$1.46 W m^{-2}$  の増分は地表面改変実験からの結果である  $1.2 W m^{-2}$  に対して 22% の過大評価であるが、各パラメータ毎の効果を見るには影響が小さいと考える。パラメータ感度実験の結果から、潜熱フラックスに大きな影響を与えるものは地表面アルベドと蒸発効率であることが明らかになったが、水体拡大の問題を考える際、パラメータ影響度とパラメータ変化分を全体として考える必要がある。この場合、地表面アルベドのパラメータ変化分は小さく (-0.006)、正味の効果としては強い制限要素になっていないこと (+0.137) がわかる。一方で蒸発効率は影響度 (+29.8) と変化分 (+0.049) の両方が大きく、レナ地域の潜熱フラックスを規定する強い制限要素であること (+1.46) が明らかになった。地表面アルベドの効果と対照的であるのが熱伝導率で、使用した 5 つの地表面パラメータの中で最も大きな変化分を持っている (+0.115)。しかし、パラメータ影響度が小さく (-1.0)、全体としては制限要素として効いていないこと (-0.115) が明らかになった。

次に、パラメータ影響度と仮想地表面を作成することにより、現在気候の下で地表面改変が起こった場合に潜熱フラックスがどう変化するかを議論する。図 6 は森林減少に伴って (草地、水体、その他) の比が変わったときの比、およびそれぞれの陸面比に対する潜熱フラックスの応答を表している。これまではその他の面積比が 0.8 であり、残りの 0.2 を草地と水体でわけ合う、としていたが、図 6 と (1) 式を組み合わせることにより、任意の地表面における潜熱フラックスの応答が評価できる。WF = 0.0 は減少した森林が全て草地へと変化する場合、1.0 は減少分が全て水体化する、と仮定した場合である。現状の気候下では、森林が草地へと変化しても潜熱フラックスの変化分はごく小さいが、わずかも水体をもつ地表面へと変化した場合、潜熱フラックスは大きく上昇することがわかる。この上昇は主に蒸発効率の効果によって発生し、地表面アルベドと熱伝導率は全体での影響が小さいことが背景として存在している。

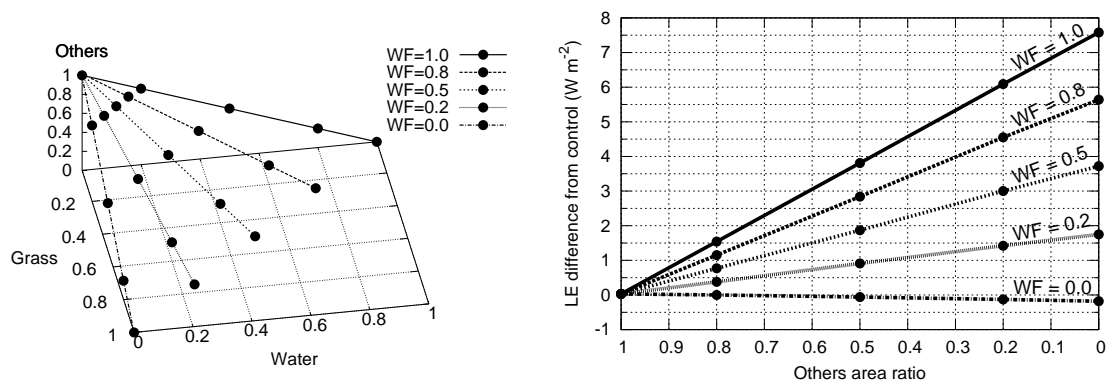


図6 仮想地表面変化実験

左、陸面比実験設定。それぞれの軸は5km格子領域の標高250m以下における草地、水体、その他(森林、低草、裸地)の占める割合を表す; 右、各陸面比に対する潜熱フラックスの応答。横軸は森林の面積比、縦軸は(草地、水体、その他)=(0.2, 0.0, 0.8)における潜熱フラックスからの差を表す

#### 4 まとめ

気象庁と気象研究所で共同開発された非静力学モデル JMA-NHM を用い、東シベリアにおける潜熱フラックスを規定する要因を明らかにし、近年報告されている地表面変化に対する潜熱フラックスの応答を明らかにした。その結果、東シベリアの潜熱フラックスを規定する影響度が大きいのは地表面アルベドと蒸発効率であることが明らかになった。他の地表面粗度、熱容量、熱伝導率の変動は潜熱フラックスへの影響が小さいことがわかった。パラメータ影響度の結果に基づき、東シベリアにおける地表面変化が潜熱フラックスに与える影響を評価した。草地が水体化した場合には蒸発効率の増分が大きく、高いパラメータ影響度もあるために全体として最も大きな規定要因であることが明らかになった。一方で地表面アルベドは高いパラメータ影響度を持ち、熱伝導率は高いパラメータ変化分を持つが、それぞれもう一方の値が大きくないために全体の制限要因としては弱いことがわかった。

パラメータ影響度と仮想地表面データを作成し、森林減少に伴う東シベリアの潜熱フラックス変化を議論した。森林が減少し、その減少分が全て草地化した場合の潜熱フラックスの変化分は小さいが、わずかも水体を持つ地表面へと変化した場合、潜熱フラックスは大きく増加することが明らかになった。

これからの課題として2点が挙げられる。まず、地表面の変化は大気側の変化に対して独立で起こっているのではなく、相互に作用して変化しているため、仮想地表面データだけではなく、大気側の初期値・境界値も将来予測される気候のデータを用いて議論するべきである。もう1つは、本研究においては森林減少が起こった場合に想定される潜熱フラックスの変化を示したが、現在水体拡大モデルが構築されつつあり、このモデルとの連携が今後の発展に大きく貢献すると考えられる。

#### 参考文献

- Iijima, Y., A. N. Fedorov, H. Park, K. Suzuki, H. Yabuki, T. C. Maximov and T. Ohata, 2010: Abrupt Increases in Soil Temperatures following Increased Precipitation in a Permafrost Region, Central Lena River Basin, Russia. *Permafrost and Periglacial Processes*, **21**, 30–41.
- Kain, J. S., 2004: The Kain-Fritsch Convective Parameterization: An Update. *Journal of Applied Meteorology*, **43**, 170–181.
- Kain, J. S. and M. Fritsch, 1990: A One-Dimensional Entraining/Detraining Plume Model and Its Application in Convective Parameterization. *Journal of the Atmospheric Sciences*, **47**, 2784–2802.

- Kurita, N., N. Yoshida, G. Inoue and E. A. Chayanova, 2004: Modern isotope climatology of Russia: A first assessment. *Journal of Geophysical Research*, **109**, D03102.
- Lopez, N. L., C. E. Gerasimov, T. Machimura, F. Takaaki, G. Iwahana, A. N. Fedorov and M. Fukuda, 2008: Comparison of carbon and water vapor exchange of forest and grassland in permafrost regions, central yakutia, russia. *Agricultural and Forest Meteorology*, **148**, 1968–1977.
- Nakanishi, M. and H. Niino, 2004: An Improved Mellor-Yamada Level-3 Model with Condensation Physics: Its Design and Verification. *Boundary-Layer Meteorology*, **112**, 1–31.
- Onogi, K., J. Tsutsui, H. Koike, M. Sakamoto, S. Kovayashi, H. Hatsushika, T. Matsumoto, N. Yamazaki, H. Kamahori, K. Takahashi, S. Kadokura, K. Wada, K. Kato, R. Oyama, T. Ose, N. Mannoji and R. Taira, 2007: The JRA-25 Reanalysis. *Journal of the Meteorological Society of Japan*, **85**, 369–432.
- Park, H., T. Yamazaki, K. Yamamoto and T. Ohta, 2008: Tempo-spatial characteristics of energy budget and evapotranspiration in the eastern siberia. *Agricultural and Forest Meteorology*, **148**, 1990–2005.
- Potapov, P., M. C. Hnasen, S. V. Stehman, T. R. Loveland and K. Pittman, 2008: Combining MODIS and Landsat imagery to estimate and map boreal forest cover loss. *Remote Sensing of Environment*, **112**, 3708–3719.
- Saito, K., T. Fujita, Y. Yamada, J. ichi Ishida, Y. Kumagai, K. Aranami, S. Ohmori, R. Nagasawa and S. Kumagai, 2006: The operational jma nonhydrostatic mesoscale model. *Monthly Weather Review*, **134**, 1266–1298.
- Solomon, S., D. Qin, M. Manning, M. Marquis, K. Averyt, M. M. Tignor, J. Henry LeRoy Miller and Z. Chen, 2007: The Physical Science Basis. *Climate Change 2007*, Cambridge University Press, 996.
- Suzuki, R., V. N. Razuvaev, O. N. Bulygina and T. Ohata, 2006: Baseline Meteorological Data in Siberia Version 4. Institute of Observational Research for Global Change, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, Yokosuka, Japan.
- Yamazaki, T., T. Ohta, R. Suzuki and T. Ohata, 2007: Flux variation in a siberian taiga forest near yakutsk estimated by a one-dimensional model with routine data, 1986-2000. *Hydrological Processes*, **21**, 2009–2015.
- 近藤純正, 1994: 水環境の気象学-地表面の水収支 熱収支-. 朝倉書店.



G 3

【グループ 3 : 人類生態グループ】





## G3a (氷結水環境チーム) 活動要約

高倉 浩樹

東北大学 東北アジア研究センター

温暖化による気温変動の幅の変化や不規則化を、「凍結水環境」で生きる人間の生活の仕組みから分析する。具体的には(1)近代公共システムと(2)民俗システム・在来知、の二つからアプローチする。

### 1. 近代公共システムへの影響

(イ)温暖化による冬道路通行期間の影響予測(奥村)と(ロ)冬道路を含む交通運輸体系の歴史(ボヤコワ)という課題をたてて分析する。特に重要なのは、氷結水環境における公共システム=冬道路システムがどのような条件で温暖化が直接影響しうるのか、どのような条件なら温暖化の影響が出ないのかを解明することで、現地公共システムに対する土木計画的観点からの評価を行うことである。現在までにわかっているのは、1)積載重量が重い車両ほど使用可能日数の減少が大きだけでなく、温度変化に対して影響が非線形的に加速することである。2)温度上昇が概ね3~5°Cであれば使用可能日数は過去14年の最小値と同等の範囲であり、過去の経験の範囲で対応できると考えられる。逆に3~5°Cの温度上昇が起きる前に、対応を進める必要があると言える。

### 2. 民俗システムへの影響・在来知の対応度

(ハ)雪解け洪水を日常としてきた地域社会で形成された洪水をめぐる在来知を記録化する(高倉)、(ニ)現在おきている雪解け洪水被害はいかなるものか(高倉)という課題の分析を中心に行う。具体的には過去5年(から30年:まだ未確定)における雪解け洪水の発生とその被害について理解を進めるとともに、地域住民の間の雪解け洪水をめぐる在来知がそれらにいかに対応しているのかを解明する。対応=災害からの物理的避難から精神的安定性(未知から既知へ)まで含む。現在までにわかっているのは、1)レナ川中流域に暮らすサハ人社会において、雪解け洪水に関わる在来知は豊富な語彙表現や洪水の発生過程に関わるシナリオという形で伝承=記録化、2)新聞記事の分析を通して、洪水発生パターンを空間的に可視化、3)洪水の現場で被災体験することで、雪解け洪水がどのようなものであるのか、身体感覚を含めた理解。さらに、4)先行研究分析において、人類学分析と気候変動研究の大まかな流れ、基本概念を把握したことである。

### 3. 今後の課題

今後の課題は、上記(1)近代公共システムへの影響、および(2)民俗システムへの影響・在来知研究、という双方のアプローチの調査研究を継続することと、その二つの統合的評価をどのようにおこなうか道筋と方法論を定めることである。特に、温暖化がどのような形で既存の近代公共システムと民俗システムの脆弱性に影響を与えるかという点で双方が比較可能な説明ができるよう試みたい。とはいえ、前者は土木工学的アプローチであり、後者は文化人類学アプローチであるため、その方法論の違いを考慮する必要がある。少なくとも、近代公共システムの研究で解明を試みるような変化の影響を量的に説明することは民俗システムの研究ではできないだろう。その意味では定性的なレベルで、脆弱性を記述することが最初のステップであると考えられる。

# 氷結水環境における民俗と在来知

高倉 浩樹

東北大学 東北アジア研究センター

## 1 はじめに

私の研究課題は、レナ川中流域の農村部サハ社会に焦点をあて、彼らが一年の半分以上凍結する水環境という自然環境をどのように利用しているのか、その利用は温暖化という気候変動によっていかなる影響を受けるのかを分析するものである。

従来の文化人類学におけるサハ社会の研究は、牧畜や狩猟などの生業活動を通じた人-自然系の解明、またソ連崩壊にともなうポスト社会主義状況における住民の生計戦略の変化、サハのエスニシティの政治化と民族文化復興運動といった領域で現地調査に基づく研究が蓄積されてきた。本研究は、このなかで人-自然系の分野に関わるものだが、その新しさは、水環境という点に焦点を絞った点である。これはサハ社会だけでなく、シベリア民族学全般において、従来開拓されてこなかったものである。特に一年の半分以上が凍結する河川環境に着目したことの意義は、生態学的恒常性を超えて人-自然系の研究を切り開く可能性をもっていることである。凍結河川は、いうまでもなく凍結と融解のプロセスを含む。とくに融解時には必ず雪氷解洪水（氾濫）が発生するのが特徴である。これはレナ川が北極海に注ぐつまり南に上流、北に下流という位置のために必然的に発生する自然現象である。

本研究課題では、こうしたいわば洪水を常態とするつまり非恒常性状態にある河川の水環境において人はどのような生態適応を行ってきたのかを解明する点に大きな特徴がある。具体的実施するのは、第一に洪水（氾濫）を組み込んだ生業歴を明らかにするとともに、そこで蓄積されてきた在来知及び生業活動の記録化を行うことである。従来この洪水は河川の氾濫原にとどまり、災害ではなかった。ところが、近年は春の洪水として「災害化」している。第二の課題は、この災害化した洪水の実態を明らかにすることである。いつ、どこでどのような洪水被害が現れるのかそのパターンを明らかにする。第三の課題は、本シベリアプロジェクトの理系研究グループとの協同のもとで、温暖化と洪水発生の関係についての知見を入手し、それが私自身の研究課題にどのような形で適用可能か検討することである。この作業を踏まえて、温暖化がレナ川中流域のサハ社会の在来知と民俗にいかなる影響を与えるのか探るのが第四の課題となる。それは、洪水に対するサハ社会のレジリエンスと脆弱性を明らかにすることである。

## 2 研究対象地域と方法

研究対象地域は、ロシア連邦サハ共和国の首都ヤクーツク市及びその隣接農村村落部である。具体的には、ナム郡カムガッタ村及びその周辺村落、ハンガル郡オイ村及びその周辺村落、ヤクーツク市特別行政区内トラギノ村及びその周辺村落の3点で継続調査を行った。この調査地域は、レナ川中流域、川の左岸部である。村落住民の大半は、サハ人であり、彼らの民俗についての人類学調査ということになる。

この地域は村落部の周囲に、レナ川の支流や湖沼が存在している。後述するが、レナ川は冬期において全面的に凍結するために、春には雪解け及び氷退け洪水（氾濫）が必ず発生する。筆者の調査の関心は、そうした春の氷融け氾濫（洪水）を常態とする生態系のなかでの住民の生業活動及び在来知にあるため、これらの三つの集落を選ぶこととなった。三つの集落の違いは、これまでの洪水被害の差異にある。トラギノ村が最も頻繁に洪水被害にあっており、オイ村においては、従来は洪水被害がほとんど無かった。カムガッタ村はその中間である。

調査方法は、参与観察を中心とする人類学的現地調査である。調査言語はサハ語およびロシア語である。すでにこれらの三つの集落では2008年以降継続的に訪問を行っており、人類学の用語でラポールとよばれる信頼関係を構築した村人がおり、それらの人々の自宅に下宿させてもらい、住み込み型の調査を行っている。なお、直接観察による行動の定量的データの収集、非構造化面談を含めて参与観察を実施している。調査の進捗状況では、質問紙による調査も行う予定である。

主な調査方法は参与観察と非構造化面談である。参与観察は、住民の日常活動に参加させてもらい、その一員として活動をともしながら中で気がついたことを記録に残し、またその過程で話しかけられたり、話しかけたことを可能な範囲でその場で記録するという方法である。

非構造化面談は、あらかじめ調査すべき項目を確認した上で、それらを下にして被面談者に質問し回答を得ていく方法である。ただし話のなかで被面談者が質問項目から外れて話が続いた場合であっても、中断することはなく、話を聞き取る。一段落ついたところで再び質問項目に戻るといった形で実施している。この理由は、インフォーマントからのなるべく量的に多くのそして質的に多様な情報を入手するためである。人類学調査で最も重要なのは、事前に知らなかった仮説を立てられなかった情報を入手することであり、そこから新しい仮説を展望できるようにすることである。そのためにこのような方法を重視する。当然ながら被面談者によって回答してもらった情報に多寡があり、また統一的な回答を得られはせず、その意味で客観性や量的に分析するための統一性は欠ける。しかしながら、そもそも被調査者の文化の全体像をつかむためにはこの方法が必要であり、また費用対効

果という点からも有効である。こうした人類学の現地調査によって、形式的な客観性に基づくデータではなく、実体的な情報の新しい質の情報を得、研究資料の質を拡張することが可能となる。

なお、調査した記録は持ち運び可能なメモ帳にその場で記録するが、当日の夜（ないしは翌朝）にはそのメモ帳にある断片的な記述を、より詳細で叙述的な調査日誌記録に変えることを行っている。この際には、見出し語をつけながら行う。筆者の場合、一日に記録する日誌は原稿用紙で平均 5 枚程度である。このため毎日最低 1-2 時間は調査日誌を記録する時間に費やされる。

### 3 結果

・2008 年 10 月 3 日から 11 月 6 日：

ヤクーツク市及びその周辺村落で予備調査、調査地を決定した。

・2010 年 5 月 9 日から 6 月 2 日：

ヤクーツク市及びその周辺村落 2 点で、在来知に関する聞き取り調査と洪水被災調査を行った。

・雪解け洪水の時空間図作成：

2006 年から 2008 年までのサハ共和国ヤクーツク市刊行の新聞を用いて、雪解け洪水の発生時期、発生地についての空間時間地図を作成した。

・その他：

気候温暖化の人類学について先行研究レビューを行った。

### 4 考察

レナ川中流域のサハ人社会において、10 月末から 11 月頭という時期が生業活動において特別の意義をもっていることがわかった。この時期は、家畜を大量に屠り、自己消費用に冷凍ないし販売する時期である。外気が零下 20 度を超える状況になると、屠って解体するだけで、そのまま肉が凍結するため、保存が簡単な形で可能となる。

また周囲の湖沼系の水環境は氷の厚さが 20 センチ前後になるが、この厚さの段階は、氷に穴をあけるのが楽であると同時に、人が乗っても壊れないだけの耐久性をもつ。そうした状態を利用して、氷下の網漁や飲料氷採取活動が行われていることがわかった。

レナ川中流域に暮らすサハ人社会において、雪解け洪水に関わる在来知は豊富な語彙表現や洪水の発生過程に関わるシナリオという形で伝承されていることがわかった。この在

来知については記録化する必要があることがわかった。また世代や個人によっても知識の多寡があることから、なるべく詳細な保持者を探し出す必要があることが判明した。

新聞記事の分析を通して、洪水がどのようなかたちで広がっていくのか可視化できるようになった。また洪水の発生についての時間と空間が明確化された情報を特定することによって、衛星画像分析の基礎情報となることが判明した。

洪水の現場で被災体験することで、雪解け洪水がどのようなものであるのか身体感覚を含めた理解を深めた。特に岸辺の崩落や直径数メートルの氷がいくつも流れてくることの恐ろしさを実感した。一方現地住民社会および村行政レベルでは洪水に対する十分な対応がとられておらず、また被害対策についても改善の余地があることが推測できた。

先行研究分析において、人類学分析と気候変動研究の大まかな流れを把握した。特に極北人類学において在来知研究が重要視される研究史の流れを理解するとともに、他の隣接分野、理系との共同関係を構築方法について、人類学分野の貢献の可能性を明確にした。またレジリアンスや脆弱性についての概念解説を行った。

## 5 おわりに

現時点では、氷結水環境の利用についてどのような調査を行うべきかどのアウトラインはつかめた。また特に秋期の生業活動についての人類学調査は一定程度資料収集を行ったといえる。しかし、雪氷解洪水についての在来知および洪水の被害調査については開始したばかりであり、今後のさらなる調査および分析することが望まれる。

また洪水記事についての新聞記事分析も引き続き実施するととともに、衛星画像との対応について今後分析をすすめていくことが必要である。

さらに、気候変動と人類学についての理論・先行研究についても、さらなる実施が望まれる。この点については来年度までに一定のレビュー論文を書くことが望ましい。

## 6 参考文献

- 北野康 2009 『水の科学』 [第三版] 日本放送出版協会
- ピルー, E. C. 2001 『水の自然誌』 古草秀子訳、河出書房新社
- 福田正己 1996 『極北シベリア』 (岩波新書) .
- Bakes, F. 2008 *Sacred Ecology* (2nd edition). New York and London: Rutledge.
- Carl Folke et al. 2002 *Resilience and Sustainable Development: Building Adaptive Capacity in a World of Transformations*. Stockholm: Environmental Advisory Council.

Krupnik, I. & D. Jolly (2002) *The Earth is Faster Now: Indigenous Observation of Arctic Environmental Change*. Fairbanks: Arctic Research Consortium of the United States.

Sommerkorn, M. & S. J. Hassol eds. (2009) *Arctic Climate Feedbacks: Global Implication*. *WWF International Arctic Programme*.  
[http://assets.panda.org/downloads/wwf\\_arctic\\_feedbacks\\_report.pdf](http://assets.panda.org/downloads/wwf_arctic_feedbacks_report.pdf) (2010. 7. 20)

# シベリアの冬道路と地球温暖化の影響

奥村 誠

東北大学 東北アジア研究センター・大学院工学研究科土木工学専攻

## 1 はじめに

東シベリア地域の気候変動がシベリアの自然と地域社会に及ぼす影響を解明するという本プロジェクトの構想段階において、著者は井上リーダーから、住宅をはじめとする建造物、上下水道や交通施設などの社会インフラに起こる問題を取り扱うよう要請された。プレリサーチの段階で調査旅費を用意していただき、2007年の秋に初めてヤクーツクを訪問し、水道、建築、住宅、電力、道路などの専門家や実務者へのヒアリング調査を敢行した。その結果わかったことは、西洋型の建造物や社会インフラは、よりマイルドな気候を持つヨーロッパの地域で長年使われてきたものに様々な工夫を加えて、無理をしながら極寒のシベリアで何とか使っているという状況であり、将来的に温暖化が進んでも、それはより本来の無理のない使い方に近づくだけであり、困ることはあまりない、ということであった。例えばヤクーツク市の上水道は、地中に埋めた水道管の中で水が凍って膨張し、パイプを中から破壊することがないように、嚴重な断熱材を巻いたパイプを地表を浮かせる形で設置し、さらにレナ川から取水した水を重油で加熱して+6°Cにしてから流すことを行っている。温暖化が進めば、必要となる重油の量が少なくて済むということであった。

本プロジェクトの中での著者の役割を果たすためには、温暖化がマイナスの影響をもたらす事象を見つけ出す必要があったが、その答えは比較的簡単に見つかった。それが本章で扱う冬道路である。冬道路とは、河川や湖沼、湿地などが凍結するのを待って、氷の上を道路として利用する交通の方法であり、シベリア地域の他にアイスランド、スウェーデン、フィンランド、カナダおよびアラスカなどに存在しているらしい。

地球温暖化が進めば河川や湖沼の凍結期間は短くなり、結果として冬道路の通行可能期間は短縮すると考えられる。もちろんそれに並行して、夏季のフェリーが使える時期は長くなるであろうが、通常の道路と同じようにほぼ好きな時に無料で通行できる冬道路に対し、有料で、かつ所定の運航時刻まで待たなければならないフェリーに置き換わることは、利用者から見れば交通コストの増加となる。さらに湖沼や湿地を縦断していくルートでは、氷がない夏季には通行できる方法がなくなるケースも少なくない。

また、電力会社のヒアリングにより、凍結期間の長さだけではなく、その期間の変動が大きくなり事前に確実に予測できなくなることが重大な問題をもたらす可能性があることが分かってきた。というのは、都市と村落を結ぶ送電線などの工事には、電柱などの重量のある機材を運搬するために冬道路の利用が前提となっている。しかし真冬の極寒期に人里離れた地域で作業を行った場合、もし車両が故障すれば作業員の生命に危険が及んでしまう。そのため送電線などの工事ができるのは冬道路開通後の1か月と、冬道路閉鎖前の春の2か月の合計3か月間に限られるという。このような状況下では、いつ河川が凍結し、いつから冬道路が使えるようになるのか、あるいはいつまで冬道路が安心して使えるのかという予測が不可欠であり、温暖化と並行して起こるであろう気候変動の拡大への科学的な対応が必要になる。

その後の3年間で、冬道路の概要、構造、設置業務、管理業務の実態に関する視察や冬道路に関する偽j通マニュアルの収集と解説を実施するとともに、河川上の氷の凍結と融解のモデリング、氷圧と積載可能な車両の重量との関係についての考察を進めてきた。本稿は以上の成果を簡単に報告しようとするものである。

以下、第2節では冬道路の概要、第3節では河川を横断する冬道路の建設の管理の実態、第4節では横断区間の利用について、第5節では温暖化の影響分析について述べる。



図1 東シベリアサハ共和国の交通ネットワーク図

## 2 東シベリアサハ共和国における冬道路の概要

### 2.1 凍結河川上の道路

シベリアにはオビ川、エニセイ川、レナ川などのように長さが5,000km、流域面積が250万平方km(日本の7倍)という巨大な河川があり、河川水運が行われていることがわかる。しかしこれらの河川も冬季は凍結してしまい、半年以上の期間は船を通すことができなくなる。冬季は気温が $-50^{\circ}\text{C}$ まで下がり、大河川でも凍結によって水運は不可能になるが、1m以上の厚みを持った氷はトラックを支えるのに十分な支持力を持っている。そこで東シベリアでは冬の凍結した河川の上に「冬道路」が設置される。橋がないために夏には渡れない河川を横切ったり、大河川の上流にある港町をつなぐような縦方向の輸送も自由に行うことができる。

### 2.2 サハ共和国の交通システムにおける冬道路

サハ共和国には全部で22,000kmの道路があるが、その3分の2はこの冬道路となっており、ヤクーツク周辺では11月上旬から翌年の4月下旬までの6ヶ月弱利用されている。図1にサハ共和国の交通ネットワーク図を



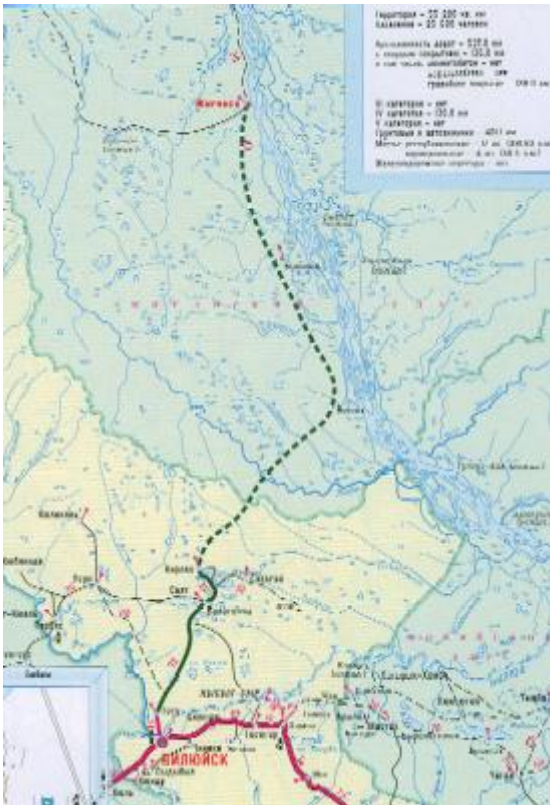


図2 レナ川下流部ジガンスク市周辺の道路地図



写真1 GoogleEarthによる、ヤクーツク南方のレナ川横断冬道路の衛星写真

示す。中央の黄色系で着色された部分がサハ共和国の範囲で、鉄道は地図の下方中央の国境からヤクーツク（Якутск）に向けて北上するシベリア鉄道の支線を建設中で、現在は途中の鉱山町であるトモット（Томмот）までの165kmが開通している。この地図の中ではオレンジ色の線が通年利用できる道路で、2つ目の緑色の線が冬道路である。船のマークが河川港の位置を示しており、もし冬道路がなければ首都ヤクーツクから到達することが困難な町が多いことが読み取れる。図1においてオレンジ色で連続的に描かれている通年道路も、大河川の横断地点には橋がなく、夏はフェリーボートを利用する必要がある。例えばサハ共和国の中央を流れるレナ川の場合、サハ共和国の領内には1本の橋もかかっていない。しかし冬には冬道路を用いた横断が可能となる。写真1はインターネット上のグーグルアースにあるヤクーツクから15kmほど上流(南)の地点の衛星写真で、川幅約900mのレナ川の本流を横断している冬道路が黒く写っている。氷の上に積もった雪を取り除けて氷の表面を出しているために黒く写ったのだと考えられる。図2は、ヤクーツクより600kmほど下流(北)のジガンスク（Жиганск）という町にいたる区間の道路地図で、この地域にはアラースと呼ばれる熱的カルスト地形が多数存在し、夏には小さな湖を持つ窪地だらけになる。また、複雑に蛇行した河川も存在しているため、夏の通行はきわめて困難であることがわかる。

以上のようにサハ共和国では、経年的に利用できる道路の整備は困難であるため、冬道路が大きな役割を果たしている。1991年のソビエト連邦崩壊以前は、すべての定住者のいる村に対して必要な生活物資をヘリコプター輸送するサービスが連邦政府の責任で実施されていたが、ソビエト連邦の崩壊によってそのようなコストを負担することができなくなり、物資の輸送を完全に冬道路に頼るようになった村が増えていると言われている。

### 3 河川上の冬道路の建設と管理

#### 3.1 ヤクーツク～ニジニベステヤーフ間の冬道路と管理

ヤクーツクから3本の連邦道路が延びているが、そのうち「コリマ街道」は、ヤクーツク市の北端からレナ川

の氷の上を 16km 使って対岸のニジニベステヤーフに横断し、北東に進んでオホーツク海の港町アルダンに向かう。ロシア連邦政府の道路局は、このような河川横断区間の冬道路の建設と管理に関する技術的な基準書を作成しており、最新の 1998 年版は図書館およびインターネットからの文書ダウンロードサービス（有料）で入手することができる。ここではこの基準書の内容のほか、実際にコリマ街道の横断地点の建設と管理を請け負っているメンテナンス会社「サハ・アヴォドール」、およびサハ共和国政府運輸省道路局でのヒアリング調査に基づいて、冬道路の建設と管理の方法を紹介していく。

冬道路の一切の管理は、運輸省（道路局）、警察省、非常事態省のなかの関連部局と道路メンテナンスの専門会社が特別委員会を結成して行う。道路メンテナンスの専門会社はサハ共和国内には何社が存在し、地域ごとに入札によって次の年の建設・管理会社を決める。管理会社は、落札できた地域内の横断地点ごとに、行政機関の講習を受けて知識を持っている人間の中から管理責任者を選定し、特別委員会において承認を受ける。横断地点ごとの通行可能期間の決定は特別委員会が行うが、上記のレナ川横断区間では例年 12 月 25 日から 4 月 15 日までの予定で通行許可を出している。運輸省でのヒアリングによれば、実際の通行許可と禁止の日付はかなり安定しており、ここ 10 年ほどでは最大でも 10 日程度の変化しかなく、特に温暖化による影響は感じられないということであった。

### 3.2 冬道路の構造と建設作業

河川に入る両側の地点は、堤防を乗り越える連絡道路の位置によってほぼ固定されている。砂質の場所ではできるだけ避けて、縦断勾配を 60%以内になるように堤防から河川に向けてスロープを作る。その材料は土および雪を使うことが多い。

水上部では、重量のある車両の下では氷がたわみ、底面の下の水圧が増す。この圧力波が重なると氷板を破壊することがある。道路の車線幅は最低 5m で、石油や天然ガスの大型タンクローリー車が通過する場合には 20m 以上とする。反対方向に走る車両からの圧力波が重ならないように往復の車線を別々に設け、中心線の間隔は 100m 以上とする。また車線ごとに最高速度と最低車間距離を設定して、前後の車両による圧力波の重なりを避ける。1 つの車線の中での車両の追い越しは許さないため、交通量が多い区間では第 3、第 4 の車線を設定することが必要な場合があるが、その場合にも車線間の間隔を 100m 以上確保する。地形上一つの車線しか設定できないところでは、道路工事区間のように信号を用いた交互の一方通行とする。見通しのよさを考えてルートはできるだけ直線で設置するが、河川の流れに対して 45 度以上の角度、あるいは流れに沿って方向の直線をつないで設定する。曲線半径は 60m 以上のゆるい曲線とする。氷の厚さは水深とほぼ比例するという傾向があるため、水上部のルートは、できるだけ水深の深い場所を選定することが望ましい。そこで、秋までに船からの水深観測を行って水深の分布図を作成しておく。もちろん秋から春にかけて水位がさらに低下していくので、その影響を見込んでおく必要がある。

12 月にはレナ川は厚さ 1m を超える氷で完全に覆われる。担当の管理会社は、夏の間閉鎖されていた両岸のプレハブの詰所を設定作業用の詰所として使える状態に戻し、ブルドーザーを用いて横断道路の設置作業を始める。予定ルートに沿って氷の上の雪を 30m ぐらいの幅で取り除き、凹凸を削って氷の表面を平らにする。氷の構造を見極めながらルートを微調整することもある。平坦な氷には、大きな氷塊が上流から流されてきてその場所に停止したものと、最後の時期まで残っていた水面が凍ったものの 2 種類がある。後者は強度が小さいので避けるようにルートを微調整するのである。

各車線の片側、中心線から 20m 離れた線上に、10~50m おきにドリルを用いて氷に穴を開ける。最後の穴は岸から 3m 以内の位置に空けるようにする。穴の直径は氷が厚いほど大きく、6~16cm とする。この穴は氷の色や空洞を観察し、ものさしを差し込んで氷の厚さを正確に測るために用いられる。さらにこの穴から氷の下を流れる水をくみ出して氷の表面にまき、冷えた空気で凍らせて氷の厚さと強度を増やすとともに、細かな凹凸をなくす。水の量は気温や風速から 24 時間以内に完全に凍る量を計算し、それを超えないように調整する。



写真2 コリマ街道冬道路のヤクーツク側入口(2009.3月筆者撮影)

最後に夜間でも通行できるように反射材のついたポールを15～20m間隔で車線の両側に立てる。兩岸の陸上部には遮断機と信号機、車両重量制限、最高時速の交通標識を設置する。荒天時や補修作業時に横断したい車両を待機させるスペースも河川敷内の陸上部に設けておく。さらに河川上では、補修作業時の振り替えに用いる予備道路を、本道路に隣接して設定する。

道路管理会社による以上の作業の完了後、基準書の計算方法に従って当該区間の車両重量制限値を決定する。制限値を40t以上に設定するときは計算だけに頼るのではなく、予定重量の10%増しの試験用のおもりを用意して実験を行う。おもりの移動実験の後に、氷に連続的な亀裂や割れが見られないこと、残留変形量が氷厚の5%を超えていないことを確認して、開放時間帯と通行開始日および予定終了日、開通後の管理作業計画に対して運輸省または地方行政の担当者による承認を受けることになる。

### 3.3 冬道路の管理体制と使用終了の判断

開通後、詰め所には道路管理会社に属する4人のグループが2交替で勤務し、24時間体制で信号の管理と目視による過積載重量車両の遮断などを行う。グループのうちの1名が代表管理者であり、観測した氷厚から基準書に基づいて通行可能車両の重量を計算し、車両重量制限、最高速度、最低車間距離などの制限を変更する権限を持っている。氷の状態が悪い場合、あるいは悪天候により視界が悪くなった時には、一時的に交通を通行止めにすることもできる。別に1組5名からなる巡回チームが1月までは3日に一回、2月からは毎日50mごとに氷の厚さと積雪深を測り、氷表面の亀裂やひび割れ、変形の有無を確認する。氷厚の測定は50mごとに開けた穴から直接メジャーで測る。この方法ならば穴から氷のサンプルを採取することも同時にできるし、補強用の水を採取するためにも穴が利用できる。あわせて1日1回外気温を測定する。

補強が必要な場合には水をまいて氷の厚さを増やす。この作業は2kmの区間ごとに本道路に並行する予備道路に交通を振り替えながら、1区間に5日間かけて行う。50mごとのドリルの穴からポンプで水を汲み、雪と木材で仕切った範囲に最大10cmの厚さの水をまく。水の深さは気温や風速から24時間以内に完全に凍る量を計算し、それを超えないように調整する。交通による氷のひび割れが見られるときには直ちに上面から水をまいて埋めるようにする。15cm以上の幅のひび割れは上から砕氷を用いて埋め、その後安定するまで通過車両の最小車間距離を100mに規制する。15cm以上のひび割れの長さが2m以上になったとき、ひび割れがくもの巣のように拡大したとき、局所的な氷の谷間や穴ができたときには直ちにその車線の交通を予備道路に回し、補修工事を行う。

春になり気温が零度を上回るようになると、日射の影響も受けて氷の厚さは減少し始める。基準書によれば、気温の3日ごとの平均値が上昇していれば、最新の観測結果を用いて可能積載重量を計算しなおす必要があるとしている。また氷の表面に融けた水が見られるようになると、観測体制や最大車両重量の規制の強化が実施される。現場の管理責任者の裁量で、終日24時間通行可能であった区間についても、通行時間を気温が低い夜間と朝に限定することができる。

基準書では、通行終了の判断基準として、

- (1) 車線の氷の表面に長い距離に渡って水が現れるようになった
- (2) 幅15cm以上のひび割れが、長い区間に渡って出現した
- (3) 明らかに氷の厚さや強度が不足するようになった
- (4) 河川の水位の変化に伴い、アプローチの坂道区間が損傷した

という条件を挙げており、管理責任者が使用期間の終了を決定するとしている。

公式禁止日以降に軍事や医療などの理由で緊急に冬道路を利用したい場合には、管理会社に申請し、特別に使用許可を認める場合がある。ただし、公式禁止日以降は氷厚の計測はしていないので安全性は不確かであり、氷上流が発生したあとは許可しないということであった。

## 4 河川上の冬道路の利用

### 4.1 利用上の制限

河川上の横断区間においては圧力波の発生を防ぐために、車線ごとに一方通行としており、最大車両重量、最高速度と最低車間距離に関する規制がある。基準書によれば最高速度は時速20km、乗用車間の車間距離は30m以上、トレーラーなどの大型車の前後は70m以上を基準とし、その場所の状況に合わせて異なる値を設定している。2009年3月4日の時点では、上記のレナ川横断地点の最大車両重量は30t、看板の最高速度は20km/hと書かれていたが、スロープの途中には10km/hの道路標識が立っていた。最低車間距離は看板の数字と道路標識の数字は同じで、45mであった。

霧あるいは吹雪の中での通行は禁止されている。また河川上の区間内での駐停車、急発進、Uターン、車線外への乗り入れ、燃料の注入などは禁止されている。故障のため自力で動けなくなった車両は岸から50m以内の場合には直ちに詰め所のロープを用いて牽引されて岸に引き上げられる。それよりも遠い場所での故障車は他の車に牽引されることになるが、必ず他の車を先導させて10km/h以下の速度で牽引する。バスなどの多人数が乗車している車両の重量制限は、安全のために貨物車に対する最大車両重量制限の3分の1の重量とする。

徒歩で横断することは、次のような通路が設置されている場合にのみ認められる。歩行者用通路は車両が通過する車線からポールで区切られた外側に設けなければならない。さらに横断区間の長さが100mを超える場合、歩行者が途中で休み体を暖めることができる中間の休憩場所を100~150mごとに設置しておく必要がある。

路線バス、消防車、救急車、道路管理関係車両、公共の目的のための緊急車両の通行は優先されるため、他の車両は待機しなければならない場合がある。

### 4.2 期間外利用による事故

過去には公式開放の前の期間、および公式禁止日以降の期間における無断での利用が行われ、氷が割れて車両が沈む事故が起こっていたが、最近の状況は良くわからない。一般の人々は、「最近でも事故は起こっている」と言うことが多いが、サハ共和国運輸省道路局のヒアリングでは、最近はマスメディアやインターネットを通じての広報を充実させており、また通行禁止日後に、交通警察が出動して監視を行っているので、期間外の無断利用は減っており、ヤクーツク周辺ではここ5年間は事故は発生していない。サハ共和国全域では2007-08年の冬には転落事故は発生していない。2006-07の冬は1台落ちたが、救命活動の結果死者はでなかった、ということである。

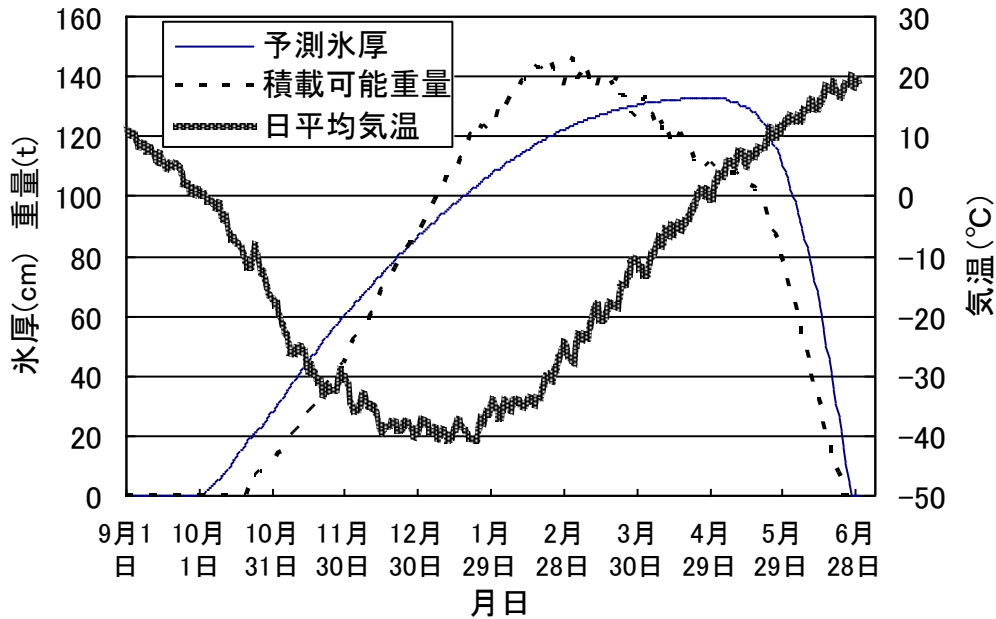


図3 ヤクーツクの年平均気温に基づく、氷厚の計算値と積載可能重量

## 5 温暖化の影響分析

### 5.1 シベリアにおける温暖化

シベリアは地球温暖化の影響を最も大きく受ける地域の一つである。例えば1975年から2000年までの平均気温の上昇は、世界の平均では0.5℃であるが、ヤクーツクでは2.5℃に達している。IPCC第4次報告書によると、シベリアの平均気温は今後25年間に1.5℃、100年間では5~6℃程度上昇すると予想されている。また降水量も冬季は増加し、夏季は若干減少すると予想されている。このような気候の変化により、今後河川が凍結しなくなることはないとしても、凍結や融解の時期が変動することが十分に考えられる。

### 5.2 冬道路の使用期間への影響

著者らは河川の氷と大気との熱のやり取りに基づいて、日々の気温が与えられた場合の河川表面の氷の厚さの変化を計算するための数式を提案して、過去の観測結果と照合した。あわせて氷の力学的強度に関する文献に基づいて、毎日の積載可能重量の値を計算した。結果は図3のとおりで、氷厚が最大になるのは気温が0℃以上となる4~5月であるのに対して、積載可能重量の最大値は氷温が低く厚さ当たりの強度が強くなる2~3月であることが確認できる。

次に過去14年間の平均気温を基準として、仮に毎日の気温がそのまま数度上昇したときの気温を与えて氷の厚さの変化を計算し、各種の車両が通行できる期間の長さがどのくらい短くなるかを計算した。その結果を図4に示している。例えば20tの車両の場合、過去14年間の平均気温から6度の上昇があると、可能期間は220日から188日と約1ヶ月間短くなる。実際にはこの可能期間になってからブルドーザーを入れて冬道路の設置作業を始めることになり、また氷の局所的な不均一性を考えれば耐荷力がなくなるぎりぎりまで通行することはできないため、冬道路として一般車両が使用できる期間は計算値よりもかなり短い。実際ヤクーツク周辺では現在、12月下旬から翌年の4月下旬までの5ヶ月弱の間冬道路が利用されている。

この計算から、今後100年間で使用可能期間の短縮は約1ヶ月であり、少しずつ準備をしていけば十分対応できる変化であるように見える。しかしながら、具体的にある目的で冬道路を利用する場合には、使用期間はより限定され、先に紹介した電力会社の送電線工事のように、凍結融解時期の変動に対する対応が容易でないケースも存在すると思われる。

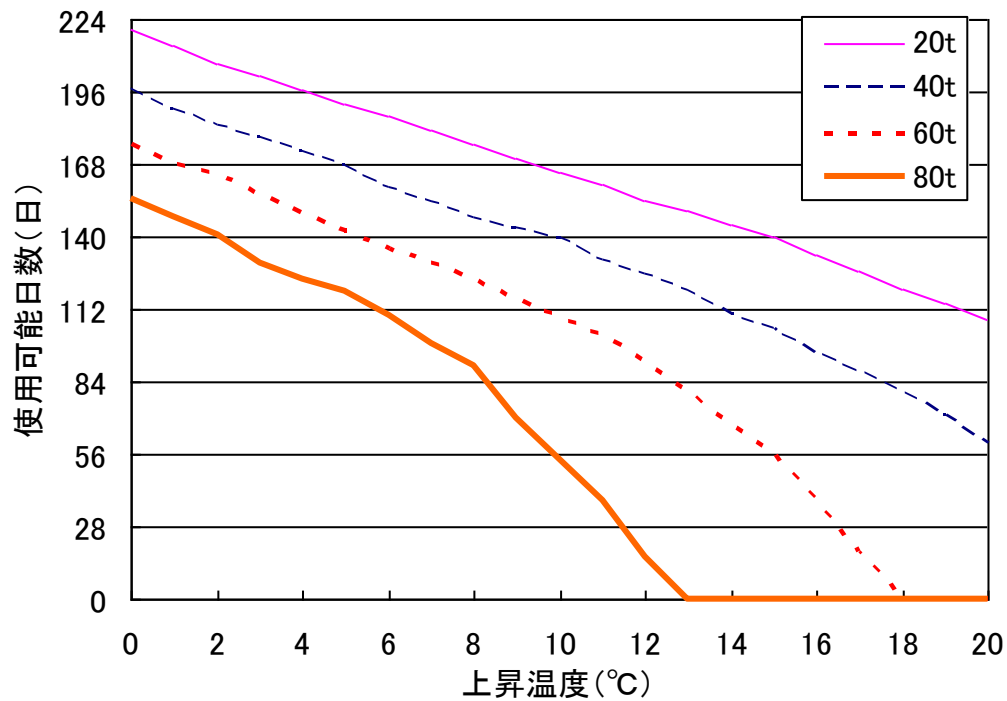


図4 ヤクーツクの気温上昇に伴う、積載可能重量ごとの使用可能日数の変化

参考文献

久保義光 1980『氷工学序説』氷工学刊行会

近藤純正, 三枝信子, 渡辺力, 山崎剛, 桑形恒男, 木村富士男 1994『水環境の気象学』朝倉書店

Federal Road Agency of Russian Federation 1998, Instructions on Design, Construction and usage of ice passages, Road Standard Highways of common use ODN 218.010-98.

## G3b (資源動物研究チーム) 活動要約

立澤 史郎

北海道大学大学院 文学研究科

### 1. 目的と体制

G3b は、主にシベリア（特にサハ共和国）において、人々の暮らしや社会生活を支える、いわゆる資源動物の動態と、それを利用する北方先住民の人々の生活等の関係、およびそれらの変容を扱う。なかでも、北方の民の生活や文化になくってはならないトナカイと人々との関係やその変化に着目する。

北方先住民の人々によるトナカイ (*Rangifer tarandus*) の利用は、家畜の利用（家畜トナカイの遊牧など）と狩猟利用（主に野生トナカイのハンティング）に大別される。家畜トナカイと野生トナカイでは、その生態や行動特性から、人の関わり方、利用の仕方に至るまで、全く異なる。そこで、東シベリア（サハ共和国）において、特にトナカイ利用が盛んな2地域、すなわちオレニョク地区とトンポ地区を主調査地とし、主に家畜トナカイ（利用）に関する調査を吉田（オレニョク地区）と中田（トンポ地区）が、また、主に野生トナカイ（利用）に関する調査を立澤と IBPC（オレニョク地区）が行うこととした。オレニョク地区とトンポ地区は、ともに代表的なトナカイ飼育地であるが、トンポ地区は高標高・極寒の地で（毛皮獣狩猟の需要が激減した現在において）トナカイ遊牧とトナカイ狩猟が主要な生業であるのに対し、一方のオレニョク地区はアナバル川上流域の高原からレナ川河口デルタ周辺（低湿地帯）に向けて土地と植生が豊かで比較的多様な生業が可能な地域である。この2地区を主調査地としたのは、このように対照的な両地区を対比することで、温暖化の元での人と資源動物（トナカイ）の関係やその変容がより立体的に描写できると考えたからである。ただし、トンポ地区（トンポーインディギルカエリア）の野生トナカイ調査については、今後予算状況等により実施の有無を判断する。

また、上記のような、温暖化による環境変化や関係の変化を経験しつつある人（北方先住民）と資源動物（主にトナカイ）との関係を、大きな時空間スケール、すなわち人類史的な観点から位置づける作業を佐々木が、現代における先住民と資源動物との関係の変化をある意味最も象徴的に示す毛皮獣（特に中型獣）と人との関係（生態や利用状況）の描写を池田が、そして、先住民と資源動物との関係において陸域生態系とともにもう一つの重要な視点である水産動物（特にシャケなどの海洋性魚類）と先住民との関係の調査を永山が、それぞれ行う。

以上のような体制により、G3b では全体として温暖化環境における先住民生活と資源動物生態との関係を、変容と適応の両面から具体的に描き出すことを目指している。

### 2. 個別テーマとプロジェクト後半の課題

2010年までの段階では、上記のような共通認識に立ちつつ調査および取りまとめの作業は個々に実施しているが、例えば吉田と立澤の調査結果（野生トナカイと家畜トナカイとの関係変化による社会問題の発生）が噛み合っただけで相補的なデータが得られるなど、個別調査の成果だけでなく G3b 班としての成果も形になりつつある。中間報告段階でのそれぞれのテーマ（タイトル）は以下の通り。

吉田 睦：サハ共和国北部におけるトナカイ飼育民と環境変化

中田 篤：サハ共和国におけるトナカイ牧畜について

立澤史郎：野生トナカイの生態変化と先住民社会への影響

池田 透：サハ共和国における毛皮獣狩猟と外来生物問題

永山ゆかり：カムチャッカ沿岸部に居住する先住民の伝統的生業にかんする調査報告

佐々木史郎：人類のシベリア進出史およびトナカイの消長について

なお、プロジェクト後半では、個々の調査の遂行とともに、以下の作業を行う必要がある。

- ① 各々が収集した情報・データベース等の共有・整理
- ② 各々のデータの突き合わせによる統合的解釈や調査ギャップの確認
- ③ 先住民の環境変化・生態変化に関する認識や対応に関する情報の効率的収集と分析
- ④ 資源動物の生態変化の要因を分析するための地形・地勢・気候・植生・水環境情報の取得・分析
- ⑤ 成果を元にした今後の予測や政策利用に関する考察

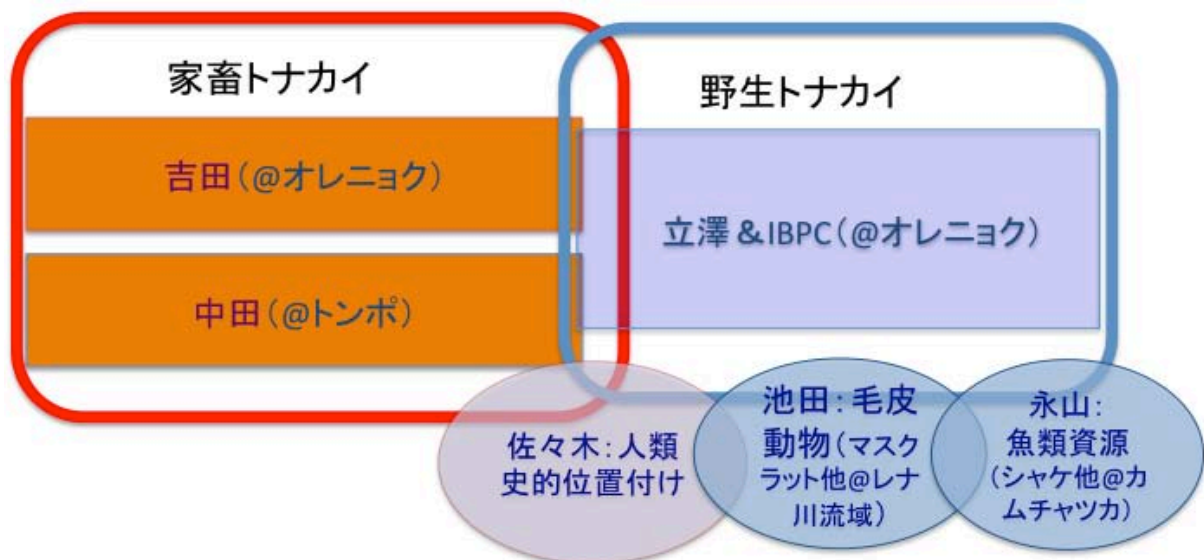


図 G3b チームの体制 (担当者・テーマ・調査地；2010年12月現在)



# サハ共和国北部におけるトナカイ飼育民と環境変化

吉田 睦  
千葉大学 文学部

## 1. はじめに

地球規模での環境変化という問題設定の下でのシベリア地域の有する意味を認識しつつ、その地域に居住する住民、とりわけ自然環境への依存の程度の高い少数先住民族の生活文化に着目する。その中でも広大な牧地を必要として移動（遊牧）生活を送るトナカイ牧畜/飼育に従事する住民を中心に、環境変化という条件下での彼らの生活・労働条件の維持・継続の実態や背景、変化への脆弱性と適応・レジリアンスとその限界等について、一定の観察結果を得ることを目的としている。

世界の家畜トナカイ頭数の概数は230万頭程度であるが、現在ロシア連邦内には167万頭程度、即ち4分の3が集中している（スカンジナビアに約60万頭）（ロシア：Rossiiskaya Federatsiia..., 2006；それ以外：Humphries, 2007）。ロシアの家畜トナカイのほとんどがシベリア・北方少数先住民族のもとで飼育されている。そもそも家畜トナカイの飼育は、これらシベリア先住民族の生業として北方ユーラシア地域の広範な地域に展開してきたものである。それが20世紀の旧ソ連期に社会主義経済体制化による農業集団化政策の下で企業経営の試みがなされ、家畜トナカイの多くが国営企業（ソフホーズ）、協同組合（コルホーズ）等の集団化された企業経営の下で飼育されるようになった（一部個人経営も残され維持された）。トナカイの飼育は、牧草を求めて移動する習性を有するトナカイとともに移動式家屋に居住しつつ移動（遊牧）する生活様式をとる形式が踏襲されてきた。従って企業経営とはいえ、企業的飼育とはいえ、ロシアでは先住民族の生業牧畜という要素と色彩を強く残していたものが多いことが特徴的といえる。

現在ロシアの最盛期の家畜トナカイ頭数は、最盛期（1970年代）の250万頭の6割程度であるが、それでも多くの地域でその飼育が存続している。そのうち、報告者は過去に民族として最も多数の家畜トナカイを擁している西シベリアのネネツ人（ツンドラ・ネネツ及び森林ネネツ）とサハ共和国のエヴェン人、エヴェンキ人（いずれもツングース系民族）のトナカイ牧畜/飼育の現場において参与観察を行ってきた。

地球規模の環境変動下における先住民族の生活の実態、変化への適応の態様、レジリアンス、並びにその限界について、一定の情報を入手し、分析する。また、この調査を通じて環境に対する先住民族の在来知（TEK）のシステムの機能や意義をも検証することで、環境変化への対応がこれらの民族の中にビルトインされているのか、どのように機能しているかを検証することも視野に入れてきた。

## 2. 研究対象地域と調査方法

2009年夏及び2010年夏に、サハ共和国内のトナカイ飼育企業トナカイ群キャンプに滞在して、参与観察を行った。

調査地は、2009年がサハ共和国コビヤイ地区北部のナムイヒン郡セビャン・キュヨリ村で、トナカイ飼育国営企業（GUP）「セビャン」のキャンプ（第9群（ブリガーダ）の1キャンプ；6日間；村10日間）に滞在した。2010年は同共和国内オレニョク地区（オレニョク・エヴェンキ民族地区）で、トナカイ飼育公営企業（MUP）「オレニョク」のキャンプ（3群6キャンプ；15日間；村5日間）に滞在、調査を行っ

た。さらに 2010 年には、追加的にオレニョク川中流域を航行して、家畜トナカイ飼育に密接な関係を有する野生トナカイの棲息状況、捕獲状況の調査も行った（3 日間）。

調査手法はヤクーツクや行政中心集落での、行政機関（農業省、行政府）、各種研究機関（人文研、農業生物研究所?）、トナカイ飼育企業組織、教育機関、マスコミ（新聞社）等でのインタビューや資料、等係累収集、遊牧キャンプでの参与観察で、補助手段として動画、静止画撮影等をおこなった。また現地調査時の補助資料として、関係地域の旧ソ連参謀本部作製の地形図（ネットからダウンロード可能）のうち 50 万分の一及び 20 万分の一地形図を使用した。

いずれも旧ソフホーズの企業経営組織であり（MUP「オレニョク」は 2006 年まで国営組織）、トナカイ肉生産はいずれの企業でも活動主体ではなく（MUP「オレニョク」は現在トナカイ肉の生産販売は行っていない）、他の企業組織への繁殖用トナカイ（種オス、メス）の供給が主要目的となっている。

### 3. 調査結果

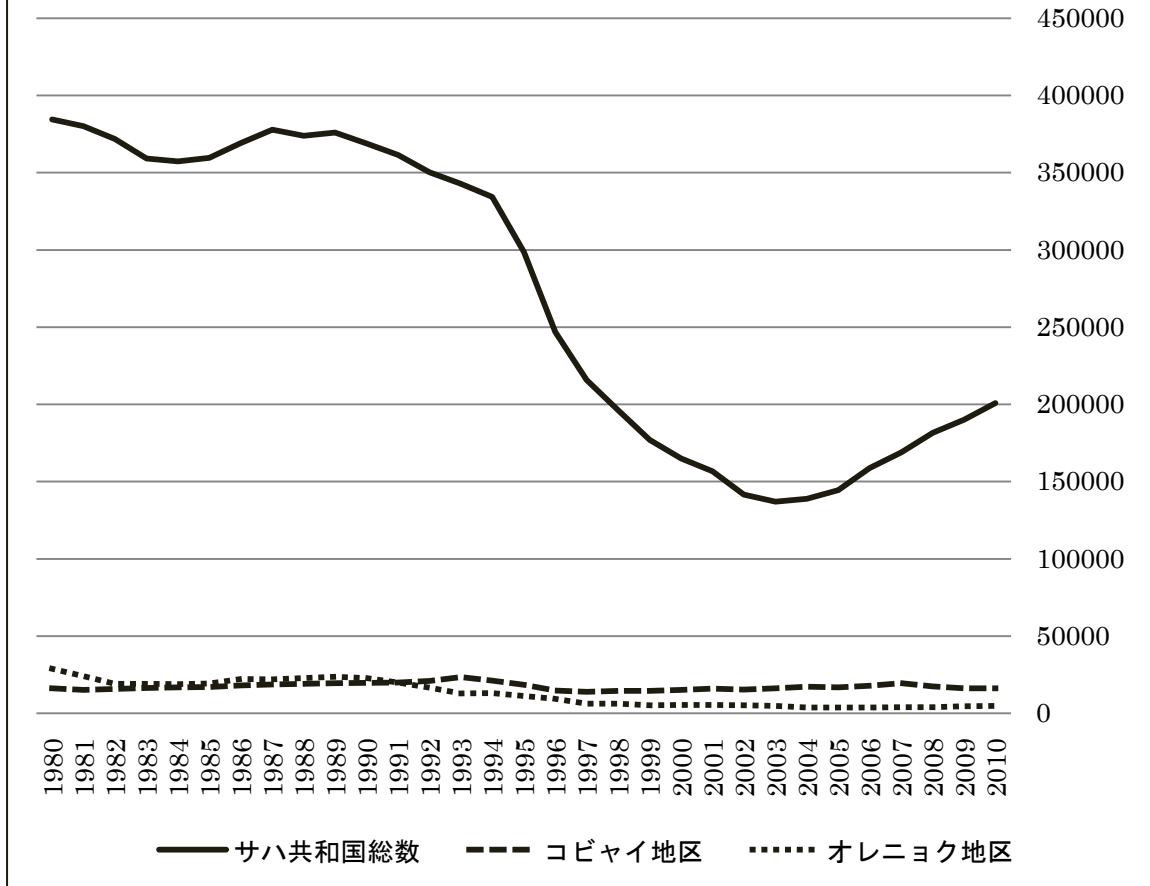
2009 年の調査地であるコビヤイ地区セビャン・キュヨリ村と 2010 年の調査地のオレニョク地区のトナカイ遊牧の現地調査をそれぞれ 3-1 と 3-2 で、また 3-3 で補足的に調査を行ったオレニョク地区の野生トナカイ棲息状況について記したい。

その前にサハ共和国と上記両地区の家畜トナカイ頭数の 1980 年以降の推移を図 1 に示しておきたい。サハ共和国全体では、30 万頭台を維持してきたソ連期であるが、ソ連崩壊以降 2003 年まで激減を続けた。最近は上昇に転じ、2010 年初頭に 20 万頭台を回復した。コビヤイ地区は 1992-1994 に 2 万頭台であったが、その前後は比較的安定した頭数（13000 頭以上）を維持してきた。それに対してオレニョク地区はソ連崩壊以降激減を続け、2003-2007 年には 3 千頭台に至ったが、それ以降は上昇傾向にある（但し最近の情勢は以下に記述した）。

#### 3.1 サハ共和国コビヤイ地区セビャン・キュヨリ村・国営企業「セビャン」での事例

コビヤイ地区はサハ共和国の中央部に位置するが、西南半はレナ川の流域低地、東北半はヴェルホヤンスク山地の高地というように地勢が異なる。以前、東北半の山岳地域は、北側に隣接する地域（現エヴェン・ブイタンタイ民族地区）と同一の行政区分（サクルイル地区）を構成していたが、1963 年にサクルイル地区は東西に隣接する 2 地区に解体・統合された経緯がある（高倉浩樹、2000）。この時調査地域は、サンガル、コビヤイというレナ川流域の低地地域のコビヤイ地区に統合された。

図1.サハ共和国とコビヤイ・オレニョク地区の家畜トナカイ頭数推移  
(1980-2010)

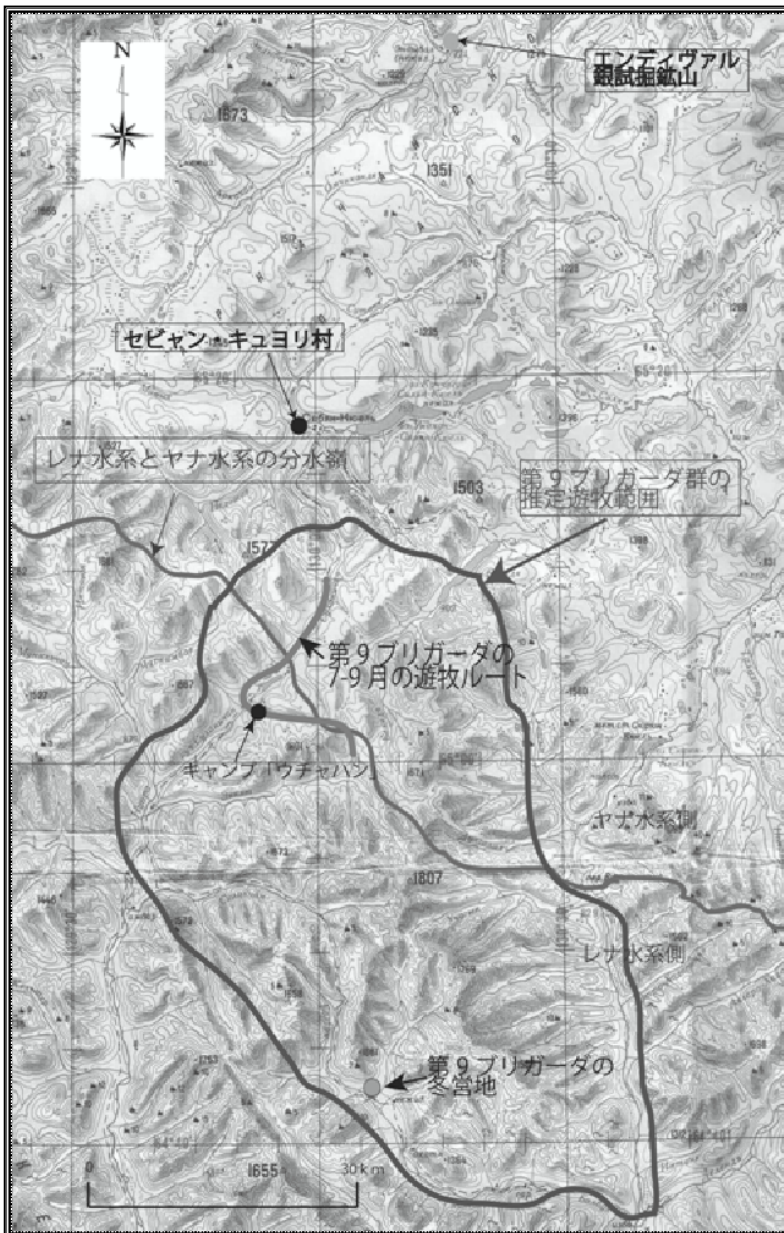


セビャン・キュヨリ村はエヴェン人の住民比率が高く（2009年1月現在711人のうちエヴェン人が85%：現地行政府資料）、また日常的にエヴェン語が使用されているという意味でも稀有な地域であり、母語と共にエヴェン民族文化が比較的保存されているといわれる（他地域は言語も含めサハ化している要素が多い）。

そのような中でセビャン・キュヨリ村に本拠地を置いてその周辺地域を放牧地として利用しているトナカイ飼育国営企業（以下：GUP）「セビャン」のトナカイ牧畜経営とその実態の調査を行った（期間は2009年8月5日より8月19日の15日間）。

そのうち8月6日より11日の間はGUP「セビャン」の10あるトナカイ群（それに対応する労働班：ブリガーダ）のうちの一つ、第9群（ブリガーダ）のキャンプにおいて現地調査を実施した。

図2. GUP「セビヤン」調査地（第9ブリガーダ遊牧範囲）



第9ブリガーダは、大凡図2に示した遊牧範囲内で周年移動を繰り返している模様である。調査時の8月初めにセビヤン・キュヨリ村の南南西方約25kmの、標高1050m前後の山岳タイガ/ツンドラ地帯の3つの小河川の合流する一地点（N65.03.728；E129.53.135；地元名称“Uchahan”）にキャンプを置いていた。当地の地形的・地勢の特徴は、まずヤナ水系とレナ水系の分水嶺に位置していること、周囲を隆起準平原状の丘に囲まれ、丘の中腹はカラマツ林が疎林状に分布していること、水源となる小川が流れていることである。キャンプ自体は毎年停留するためその周囲はトナカイの餌となる蘚苔類や草本類は良好な状態にはなく、集群時以外、トナカイは周囲の山岳地帯に散開してしまう。そのため毎朝それらを集群するには相当な労力を要する。

夏季のため集落より女性（牧夫の妻や親戚）や就学児童生徒（夏季の季節労働）がキャンプに滞在していたため、かなり大所帯であり、7テントで20人前後の人数

であった（常時車輛によるメンバーの出入りがある）。

サハ共和国北部の山岳タイガ/ツンドラ地帯の特徴の一つとして、草原やツンドラの分布に混ざって岩場が随所に堆積している。極端な気温の年較差の故と思われる岩石の破碎が激しく、容易に動物が傷を受けやすい鋭利な岩石、岩石片が卓越している。家畜トナカイがこれらの岩石帯により足を損傷するケースは日常的である。またオオカミ、ヒグマ等の野生肉食獣による食害が頻発している。

上記のような、遊牧キャンプにおける夏季のトナカイ放牧作業における環境変化やその影響についての調査、並びに村での定住者へのインタビュー調査の結果は以下のとおりである。

### 遊牧生活者

遊牧生活者の環境認識の中で、近年の環境変化傾向は特に顕著に認識されているわけではない。以下の3点くらいである。

- A) 気温の変化：春季の低温化傾向があり、それによる融雪氷結の繰返しがより頻繁→トナカイ幼獣の生存率が悪い
- B) 降水：夏季の降雨量増加傾向があり、河川の氾濫・洪水も頻繁化している→放牧地の荒廃・流失が発生している→放牧ルートの変更も余儀なくされる。洪水・氾濫に起因する放牧面積の縮小という状況も現出しており、その結果としての過放牧状況も危惧されている。
- C) 動物相の変化：環境変化との関連は明白ではないが、家畜トナカイ及び飼育ウマに取っての害獣であるオオカミ、ヒグマ、クズリの個体数が増加しているように思われる。それによる家畜トナカイの食害が頻繁化している。

#### 定住者

- A) 気温の変化：冬季の高温傾向が認められる。
- B) 降水：雨季（当地区では夏季3カ月；6-8月に年降水量の大部分が降水する）の降雨量増加傾向が感じられる。それによると思われる河川氾濫の頻発・常態化がある。村内の護岸（河川敷の岩や廃材等で作る簡単な堤防）や歩行橋等のインフラの損傷、破壊が発生している。
- C) 人的要因であるが、暖房用薪（カラマツ）の採取による森林破壊が常態化している。これが洪水の劇症化の一因になっているかもしれない。

### 3.2 サハ共和国オレニョク地区オレニョク集落及びハルイヤラフ集落及び遊牧キャンプでのトナカイ飼育公営企業「オレニョク」及びオレニョク川の野生トナカイ調査の事例

オレニョク地区はサハ共和国の北西部に位置し、面積 31.8km<sup>2</sup>を有する（日本の国土の 84%）大きな行政単位である。北部はツンドラ、中部以南はカラマツの卓越するタイガ地帯である。当地区はオレニョク・エヴェンキ・民族地区として認定され、エヴェンキ人が多い（約半数）。しかしそのほとんどは母語がサハ語である。旧ソフホーズ系の公営企業（以下 MUP）「オレニョク」があり、2010 年初めの総トナカイ頭数 4019 頭である。この他に北部のジリンダ村にも MUP「ジリンダ」があり、トナカイを千頭程度飼育している。なお、当該地区のエヴェンキ人居住者についての歴史的な背景、トナカイ飼育従事者の最近の情勢や変化の要因については最近の論考がある（高倉浩樹、2008）。

集落は中心集落のオレニョクがある他、オレニョク川を挟んだ対岸にハルイヤラフ集落がある。MUP「オレニョク」の本拠地はハルイヤラフ集落にある。MUP「オレニョク」は、ソ連期のソフホーズ時代、1960年代には26000 - 29000頭台、1970年代には4万頭を越える家畜トナカイ頭数を誇ったが、その後ペレストロイカ期及びソ連崩壊期に頭数を激減させ、現在4千頭しかいない（Olenekskii ulus, 2005）。現地調査地は当地方の北西端からクラスノヤルスク地方に入った山岳ツンドラ地帯から森林ツンドラ地帯に入る場所で、8月23日から9月6日の15日間、キャンプ移動しつつ6キャンプ（3ブリガーダ）に滞在・調査した。

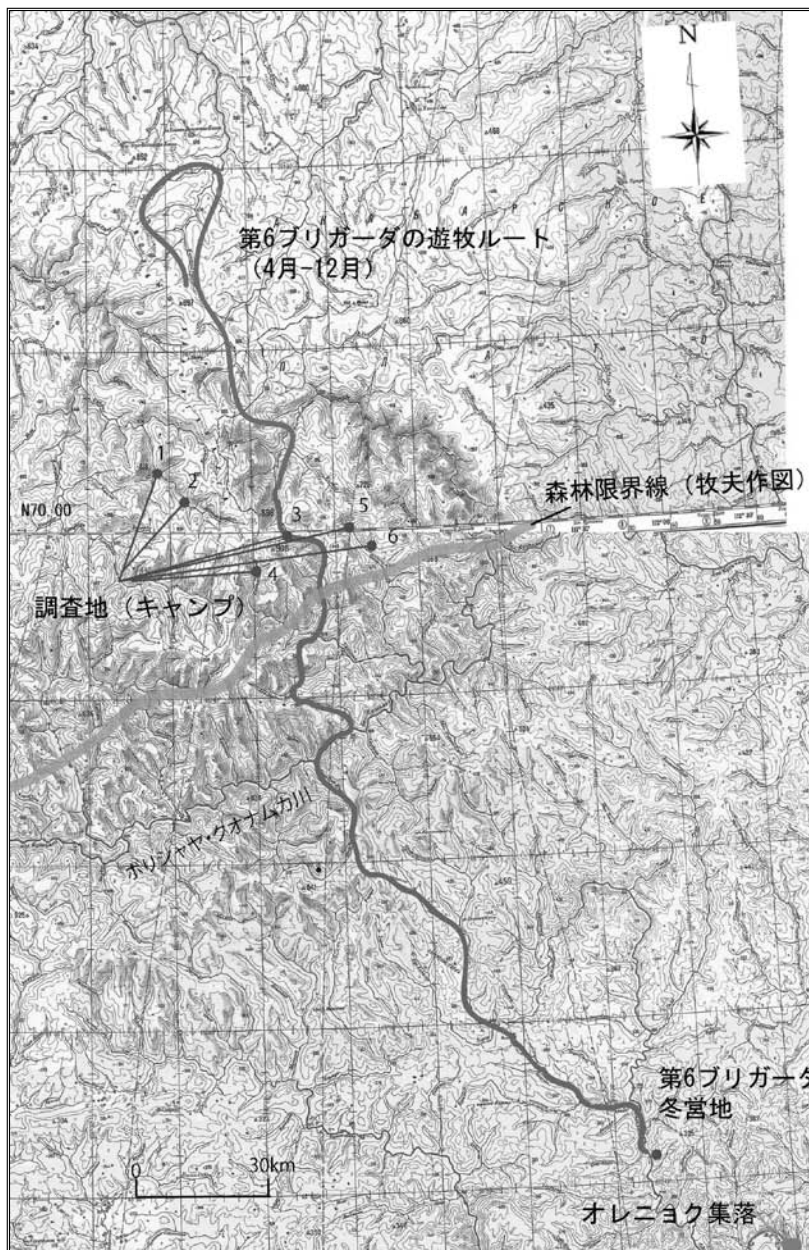


図3. MUP「オレニョク」調査地（6キャンプ地及び第6ブリガダ遊牧ルート）

MUP「オレニョク」のトナカイ群は調査時点の8月下旬から9月上旬には、サハ共和国とクラスノヤルスク地方の境界付近を南下する形で遊牧していた。現在保有する3つの群（1,5,6群）のうちの一群（第6ブリガダ）の年間遊牧ルートを図3に示した。7-8月はクラスノヤルスク地方の山岳ツンドラ地帯を越境放牧し、順次サハ共和国（オレニョク地方）側の冬営地に向けて南下してくる。12月より3月末まではオレニョク村まで約70kmの地点に設営された冬営地に滞在してトナカイの放牧に従事する。冬季の冬営地長期滞在（3-4ヶ月）がこの地域（エヴェン、エヴェンキ）のトナカイ牧畜/飼育の一つの特徴のようである。この点では冬季も随時移動する西シベリアのツンドラ・ネネツの実態とは異なる。

今回 MUP「オレニョク」の

3つの全てのブリガダに移動を伴いつつ計6か所のキャンプに滞在することとなった。そのうち9月3日に移動した第5ブリガダの第二キャンプ、すなわち最終キャンプ（図の東端のキャンプ）は今回初めての森林ツンドラ帯のキャンプであった。第5キャンプ第一キャンプと第二キャンプの間は約12kmであったが、その間にカラマツの疎林が出現し、第二キャンプは視界の利きにくい疎林の中の地所であった。

各ブリガダの構成員は労働班長（ブリガジール）の下で家族（妻・家事労働者〔チュム・ラボートニツツァ〕）、被雇用牧夫（親戚その他）、畜産技士等である。なお我々に獣医が随行し、アブの幼虫予防接種（アブがトナカイに産みつけた卵や幼虫を駆除する）及び血液検査を実施した（プルセラ症の陰・陽性検査）。各ブリガダには夏季限定の勤労生徒数名を含め10名前後の人員が居住していた。

遊牧生活者の環境変化やその影響についての認識調査は以下のとおりである。

- A) 気温：概して夏季の低温化傾向、冬季の高温化傾向が感じられる。夏というのは10日あるいはそれ以上一定の暑さの日が続いてから、また気温が下がってくるものだったが、近年はその暑さの続く日というのがはっきりしないうちに秋になっていく印象。また冬季は10月あたりでも気温が零度近く

まで上昇して融雪したりという異常気象がみられる。

- B) 降水：増加傾向がある。以前よりとにかく降水量も頻度も増えたように思う。(報告者のキャンプ滞在中もテントにたたきつけるような雨脚の雨が数回降ったが、「こんな降り方は以前(20-30年前)は滅多になかった。」という意見が再三聞かれた)
- C) 森林限界の北漸：この地域でキャンプの畜産技師の描いた森林限界線は、ボリシヤヤ・クオナムカ川の北側にある(図3)。しかしここ2—30年間ではその限界線が北上している模様である。上記のように今回の移動ルートの中の最後のキャンプ間を南下した際、カラマツが出現し急激に増えて一気に疎林となった地帯がある。これはN69.58.587E110.13.101付近であるが、畜産技師の描いたラインより北に10km以上の場所である(図3)。

「森林が北上して困ることはないか」との報告者の質問に対して、ある牧民は「今のところ特になが、強いて言えば森林内は移動がしにくく時間を要するので、冬営地までの移動により日数がかかるようになる」と冗談交じりの答えが返ってきた。

- D) 動物相の変化：環境変化との関連は不明だが、夏季放牧地に野生トナカイが出現したのが1976年以降のことである。それ以後は常時野生トナカイの遊動ルートとなっている。野生トナカイは狩猟の対象となり、肉や毛皮の供給源としての重要な意味もある。他方、多数の野生トナカイの出現は、家畜トナカイを連れ去ることがあるので大変困った事態となる。

(なお、調査後、11月13日にMUP「オレニョク」所長から入った連絡では、1200頭を擁していた第6ブリガーダの家畜トナカイが野生トナカイに連れ去られ、現在700頭余になってしまっている、とのことである。野生トナカイの接近で、このような深刻な事態が発生することがある。)

### 3.3 オレニョク川中流域野生トナカイ棲息状況

8月20-22日の間、オレニョク川の中流域(オレニョク村から下流に160km地点までの間)をモーターボートで移動しつつ、野生トナカイの棲息、渡渉状況の観察・記録調査を行った。この時期にはかなり多数の野生トナカイがオレニョク川中流域に集結している模様であり、僅か3日間の移動中並びにキャンプ地で多数の野生トナカイ渡渉機会に接した。一度に渡渉する頭数はオス単独から母仔2頭、オス2頭等少数から15-20頭程度まで多様であり、また、人の存在は警戒しているが、時に人の気配のする中を渡渉していくような状況もあった。

このような野生トナカイの渡渉は多くのハンターを寄せ付けているようで、移動中多数のハンターにより屠畜され、河原に放置された野生トナカイの屠体や放置された毛皮、角付頭骨を数多く目にした。野生トナカイの狩猟にはライセンスの購入が必要とされている。この時に目にしたハンターがすべてライセンスを保有しているのか否かについての情報は得られなかった。

なお、報告者はこれまでロシア(ソ連)の民族学の研究書等で、野生トナカイの大河川の渡渉は多数頭が集結して一気に行う例示が多く、この調査のように単独からせいぜい10数頭単位で散発的に随時渡渉していくことは予想していなかった。これは報告者にとって新鮮な光景であり、あまり周知されていない野生トナカイの生態の一端に触れた気がした。

## 4. 考察

極北・高緯度地方住民ないし生態系の対環境/気候脆弱性については広く知られ、中でも先住民社会、殊に伝統生業に従事している先住民民族の場合は、その深刻性が高いであろうことは容易に想像可能である。近年、この地域の気候変動傾向はかつての予想以上に大きいことが指摘されている(Ford & Furgal, 2009)。

このような中で、高緯度地方の先住民社会の気候・環境変動に対する脆弱性、レジリアンスの分析と検討は焦眉の課題である。

他方で、ロシア極北部に関しては、ソ連崩壊後も先住民社会は、旧ソ連体制下の経済社会的遺産の中で、環境・気候変動以外の社会的経済的諸要因（土地利用/所有形態等）の生存に係る重要性故に、環境・気候変動に対する注目度は西側におけるそれと比べてはるかに低かったり、懐疑的であったのが実情である。ロシア極北地域研究にも西側で設定されたテーマと視点での調査が実施され始めているのが最近の情勢であるが、これに対する批判的アプローチもある（Forbes & Stammlar, 2009）。とはいえ、これまで気候変動に伴う極北地域調査において、予測ないし観察がなされた生態系の反応としては、灌木の増加、降水量と積雪状況の変化、温暖化と永久凍土の融解、湖沼と湿地の乾燥化、温室効果ガスの発生等があるが、それらを極北の先住民社会で具体的に適用していくには、地域的民族的特色に対応する視点が必要であるとの指摘もある（Forbes & Stammlar, 2009）。今回の調査はこれらの諸点を含め、変化への対応について網羅的に調査することはできなかったが、以下簡単に総括する。

2009年の調査地（ヴェルホヤンスク山脈の山岳タイガツンドラ・エヴェン）と2010年の調査地（オレニョク地区北西方の山岳ツンドラ・エヴェンキ）の比較での相違点として、前者では夏季降水量の増加・頻繁化によると思われる洪水が頻発するようになり、放牧地の一部が荒廃している事実が確認された。対照的に、後者ではこのような形での牧地の荒廃は認識されていない様子であった。これは前者が高地でかつ周囲の山と比較的高低差のある河谷に夏季の牧地が展開し、洪水被害を受けやすいことが指摘できる。後者の夏季放牧地は、隆起準平原状のなだらかなツンドラ地帯の間に河川が流れる形であり、洪水・氾濫は起こりにくいか、起こっても周囲のツンドラ（沼沢地）に氾濫・浸潤するような状況であることが推測される。

但し後者でもカラマツの卓越する森林の北漸が指摘され、牧地の質的变化が生じているといえる。また野生トナカイの移動ルートと家畜トナカイの放牧地が錯綜する中で家畜トナカイの連れ去りが頻発したりすることと環境変化との連関は直ちに論証できないが、その可能性は指摘できる。これはオオカミやヒグマ等の「害獣」の生態の変化と被害の頻発などと同様、関連性の調査が必要かもしれない。オレニョク地区のMUP「オレニョク」の所長の談によると、同企業の家畜トナカイ数の激減の原因は野生トナカイ群の出現であるという。ジリンダ村でも野生トナカイの出現による家畜トナカイの混淆と連れ去りが発生している模様で、その原因としてダイヤモンド開発の可能性が挙げられている（高倉浩樹、2008）。

西シベリアのトナカイ牧畜民ツンドラ・ネネツを現地調査しているF.シュタムラーによれば、彼らの放牧域ではヤナギ類を中心とした灌木の繁茂が著しく、放牧に否定的に影響していることが指摘されている

（Forbes & Stammlar, 2009）。サハ共和国の2か所の企業経営のトナカイ飼育現場では、カラマツ林の北漸の話はあったが、灌木類の生育状況の変化の話は出なかった。しかし、トナカイの餌となる植生（変化）についてはトナカイ放牧と直接関連する事項として関係者も多大の関心を有している。残念ながら、サハ共和国におけるこの分野の調査・研究は1980年代以降、即ちソ連崩壊以降、ほとんど進展していない。2010年の調査地でも万年雪の一方的後退が指摘され、植生や土壌、永久凍土の変化は今後の調査を待つ必要があるといえる。トナカイ牧畜/飼育民社会の調査という点では、生業文化と密接に関係する土壌、植生に係る植物生態学や植物地理学的視点からの観察・調査が同時並行的に行われることが望ましいといえる。

2010年には野生トナカイの大河川渡渉の状況を観察できた。野生トナカイは家畜トナカイ飼育/牧畜者にとっては上述の通り両義的な存在である。牧畜民は野生トナカイの動向には常に注意を払っている。害獣と言われるクマ、オオカミ等も含めた野生動物の生態は、先住民社会においては極めて利害関係の絡む必須情報であることが、報告者のいずれの調査地（西シベリア・ネネツ社会、サハ共和国エヴェン・エヴェンキ社会）でも確認されている。オレニョク地方も調査範囲となっているG3の野生トナカイの動向調



査の結果が待たれるところである。

## 5. 結語

2009年及び2010年のいずれも夏季の短期的な調査であったので、体系的な環境認識や在来知を調査するには至っていない。特に「温暖化」の観点からは、寒冷地における冬季の状況の調査は不可欠といえるが、結氷期・解氷期、積雪量、融雪の時期や状況、春季の洪水等の詳細は当該時期の調査を待たないと期待できない。しかしながら、夏季を中心とするトナカイ牧畜/飼育に従事する人々の環境変化に関する主要な関心事項については考察出来たのではないかと思う。とりわけトナカイ牧畜/飼育は、国営ないし公営企業という企業組織による経営ながら、在来知に大きく依存する生業牧畜に近い実態であることも確認された。極北地域の先住民族は、依然として諸権利が否定されている状況下にある上に、国連の気候変動に関する交渉マターからも大凡排除されているというのが現状である (Green & Raygorodetsky, 2010)。それだけに、環境変化に対する脆弱性を孕む先住民の生業活動を、民族文化の保持という非経済的理由からも保護推進していく必要があるとみなされる限り、その具体的方途を模索していくこと、同時に遊牧(移動)生活者のレジリアンスというような生存文化的側面の検証・分析もさらに進めていくことが課題といえる。そこでは、環境と生態にかかわる生業活動の文化的側面を検証し分析する人類学者の貢献が期待されてしかるべきである。

## 6. 参考文献

- B.C. Forbes & F. Stammlar, Arctic climate change discourse: the contrasting politics of research agendas in the West and Russia, *Polar Research*. 28 2009. 28-42.
- J.D. Ford & C. Furgal, Forward to the special issue: climate change impacts, adaptation and vulnerability in the Arctic, *Polar Research*. 28 2009. 1-9.
- D. Green & G. Raygorodetsky, Indigenous knowledge of a changing climate. *Climate Change*. 100 2010 239-242.
- J.E. Humphries, Reindeer Markets in the Circumpolar North: An Economic Outlook. University of Alaska, Anchorage, Institute for Social and Economic Research. September 2007.
- Olenekskii ulus. Istorii, kul'tura, fol'klor*. Yakutsk: Bichik. 2005.
- Rossiiskaya Federatsiia Federal'naya sluzhba gosudarstvennoi statistiki. *Itogi Vserossiiskoi perepisi 2006 goda*. Vol.7. Moscow: IITs "Statistika Rossii". 2008
- 高倉浩樹『社会主義の民族誌—シベリア・トナカイ飼育の風景』東京都立大学出版会
- 高倉浩樹「エヴェンキ: トナカイ飼育の崩壊と狩猟への転換」『季刊民族学』124, 2008. 8-13.

図版出典:

図 1: Ministerstvo sel'skogo khoziaistva Respublika Sakha (Yakutiia), Domashnee olenevodstvo Respubliki Sakha (Yakutiia). Yakutsk. 2010 の該当データより作成

図 2、図 3: 現地収集データを基に著者作成

# サハ共和国におけるトナカイ牧畜について

中田 篤  
北海道立北方民族博物館

## 1. はじめに

本報告は、サハ共和国の先住民エベンの氏族共同体におけるトナカイ牧畜の実態を明らかにするとともに、地球温暖化がトナカイ牧畜に与える影響を評価することを目的としている。

トナカイ牧畜は、ユーラシア大陸北部地域において、先住民の生業として重要な役割を果たしてきたことが知られている（高倉 2009）。

スカンジナビア半島のサミ、シベリア北西部のネネツ、シベリア南部のトバ、シベリア東部のエベンキ、シベリア北東部のチュクチ、カムチャツカ半島周辺のコリヤークなど、トナカイ牧畜は広大な地域で数多くの民族によって営まれてきた。

また、特にソ連崩壊後のロシアにおいては、トナカイ牧畜の経営主体はそれまでの集団農場から、国営企業、民間企業、氏族共同体など、多様な形態に変化している（Jernsletten and Klokov, 2002）。

しかし、こうした状況にもかかわらず、トナカイ牧畜がどのように営まれてきたのかといった民族誌的情報、特にトナカイの日常的な放牧や管理の方法に関する報告は少ない。

一方、近年の石油や天然ガスといった地下天然資源の開発や地球温暖化に起因する環境変化により、各地のトナカイ牧畜民が悪影響を受ける事例が報告されている（Oskal *et al.* eds, 2009）。しかし、それぞれの地域によって、環境変化の質や規模、そしてそれらがトナカイ牧畜に与える影響の重大性は多様である。

そこで本研究では、まずトナカイの日常的な放牧管理方法、つまり遊牧氏族共同体におけるトナカイ牧畜の現状と日常的な管理方法の把握、そしてその季節的変動および経年変化の把握を目的とした。そして最終的には、トナカイの行動生態に影響を及ぼす気候要因を抽出し、当該地域のトナカイ牧畜と照合することによって、気候変動がトナカイ牧畜に及ぼす影響の評価を意図している。

本研究プロジェクトのグループ3では、地球温暖化が人間生活に与える影響および人間社会の適応をテーマとしている。そのなかで、本研究は、先住民の主要な生業であるトナカイ牧畜、特に氏族共同体を経営主体とした事例を対象としたものである。

## 2. 研究対象地域と方法

### 2.1 調査地

本研究における現地調査は、サハ共和国の東部、レナ川の支流・アルダン川水系に属するハンディガ川とその支流沿いに広がるトンポ郡にておこなわれた（図1）。

ロシアでは、社会主義体制の崩壊後、社会制度の変化や市場経済の導入によって、連邦の全域でトナカイ頭数が大きく減少したが、ここ数年は徐々に回復しつつある。サハ共和国においては、ウルス（以下、「郡」と表記）と呼ばれる行政単位によって、飼育トナカイ頭数やその増減傾向には違いがある（表1）。このなかでトンポ郡は、サハ共和国における飼育トナカイ全体の10%以上を飼育する最大のトナカイ飼育地域と言えるだろう。



図1. 調査地の地図



写真1. パガダエフ共同体の新放牧地

表1. サハ共和国の各郡における飼育トナカイ頭数の推移

		トナカイ頭数 (年末/頭)							
年	1990	1995	2000	2004	2005	2006	2007	2008	
サハ共和国全体	361,556	246,850	156,237	144,478	153,731	168,918	181,673	190,125	
北方先住民族居住地 域	348,812	238,799	147,793	127,178	135,453	150,639	160,683	152,354	
サハ全体に占める割合	96.5	96.7	94.6	88.0	88.1	89.2	88.4	80.1	
アブイ郡	6,115	3,175	952	455	496	468	397	358	
アルダン郡	14,786	13,757	10,574	9,889	9,868	10,265	11,033	11,812	
アルライホフ郡	20,515	11,961	4,916	1,832	2,120	2,787	2,954	2,207	
アナバル郡	24,758	21,262	16,214	11,211	12,454	13,541	15,003	15,485	
ブルン郡	30,021	19,257	10,732	10,738	11,102	12,351	14,652	13,108	
ベルフネコリム郡	8,528	5,620	1,321	1,327	1,491	922	599	580	
ジガン郡	12,507	6,820	5,580	4,541	5,201	6,126	6,100	6,164	
カビヤイ郡	19,957	14,731	15,983	16,838	17,829	19,459	17,490	11,178	
ミルニン郡	374	100	8	6	8	9	-	-	
モム郡	31,911	25,366	15,671	12,877	13,480	14,701	15,604	16,224	
ネリユングリ郡	11,996	11,886	5,135	5,456	5,891	6,195	6,755	6,249	
ニジニェコリム郡	35,138	20,320	10,188	10,507	11,307	14,185	14,413	10,715	
オイミヤコン郡	18,316	12,217	9,210	7,858	9,217	10,422	11,507	11,368	
オレクミン郡	3,714	2,470	2,750	2,435	2,150	2,213	2,714	2,958	
オレニェク郡	20,047	9,410	5,541	3,826	3,752	3,957	4,072	4,694	
スレドニェコリム郡	6,923	5,302	2,434	1,659	1,607	1,816	2,203	2,577	
トンポ郡	23,896	20,730	12,760	15,693	16,321	18,714	20,245	20,545	
ウスチ-マヤ郡	1,093	555	314	-	-	-	-	-	
ウスチ-ヤン郡	31,888	17,252	7,860	-	-	68	82	-	
エヴェノ-ブイタンタイ 郡	26,329	16,608	9,650	10,030	11,159	12,440	14,860	16,132	

(出典：サハ共和国 (ヤクーチア) 国立統計局編「北方先住少数民族が居住する郡の社会・経済的状况に関する複数の指数について 1990、1995、2000、2003-2008年」)

## 2.2 調査対象

調査対象は、トナカイ牧畜を営むピョートル・エゴロヴィチ・パガダエフ名称・遊牧-氏族共同体 (以下、パガダエフ共同体) である。1993年にヤクーツク最高会議にて、シベリア先住少数民族の氏族、血縁種族の遊牧共同体に関する法制度が採択され、その後ほぼ1年間に273の氏族共同体が創設・登録された。

トンポ郡では、ソ連崩壊後、ソフホーズの経営を引き継いだ農業生産会社「トンポ」によってトナカイ

牧畜がおこなわれていたが、1998年にトンポ郡の著名なトナカイ牧夫だったピョートル・エゴロヴィチ・パガダエフの子どもたちとその家族が、農業生産会社「トンポ」から独立し、父親の名を冠した氏族共同体（パガダエフ共同体）を創設したのである。1998年の共同体創設時には、飼育トナカイ頭数は78頭に過ぎなかったものの、その後他地域からの購入や繁殖によって着実にトナカイ数を増やし、現在は約800頭を管理するまでに至っている。

パガダエフ共同体の管理するトナカイ群の周囲には、それぞれ数km～数十kmの間隔を置いて農業生産会社「トンポ」が管理する4つのトナカイ群（No.3～No.6）があり、各1000～2000頭のトナカイを管理している。パガダエフ共同体のトナカイの一部は、それら周囲のトナカイ群に混入している。パガダエフ共同体では、こうした混入を防ぐため、近年別の場所に新たな放牧地を確保し、2010年には所有トナカイの一部（約70頭）を移転して放牧を開始した。

現在、パガダエフ共同体で働いているのは14人程度で、それぞれが分担してトナカイ牧畜業に従事している。

## 2.3 調査方法

現地フィールド調査は、2009年7月27日～8月30日および2010年9月18日～10月5日に実施した。このうち2009年にはトナカイ群全体を管理するキャンプに滞在し、S1氏（男性、39歳）に対するインタビューを中心にトナカイ管理全般や年間のスケジュールに関するデータを収集した。また、2010年には新放牧地に移転された約70頭を管理するキャンプに滞在し、参与観察を中心に日常的な放牧方法に関するデータを収集した。

また、補足的な情報収集のため、パガダエフ共同体のトナカイ管理台帳およびサハ共和国農業統計資料を利用した。

## 3. 結果

### 3.1 トナカイ管理全般について

トナカイの放牧管理は、8～10日ごとにキャンプ地と放牧地を移動しながらおこなっている。キャンプ地間の一回の移動距離は5～10km程度である。

年間の移動スケジュールとしては、12～4月にはパガダエフ共同体の成員の自宅があるトポリーノ村に居住しながら村の周辺で放牧をおこない、4月～12月にはトポリーノ村から約200km離れた放牧地でテント生活をしながら遊牧をおこなう。その間、6月および10～11月にはトナカイを囲いに集め、頭数計測をおこなう。また、10～11月の頭数計測時には、販売用にトナカイを屠殺する。

### 3.2 トナカイ・キャンプにおける日常的な放牧方法

トナカイ群の一部（70頭）を2010年5月10日に新放牧地に移転した。トナカイは、ハンディガ川支流の川沿いに設置されたテントを中心に、その周辺で放牧されている。川の両岸には急峻な山地が発達しているが、谷間には幅100～200m程度の平坦な地域が広がっている（写真1）。テント付近の川沿い地域は開けているが、200～300mほど離れるとカラマツや白樺類を中心とした森林に覆われており、そうした林は山地の中腹付近まで続いている。

この放牧地では、50歳台の夫婦（夫Aと妻D）、2人の息子S2（25歳、すでに結婚して独立しているが、トナカイ管理のため両親と同居）、V（13歳）から成るA家族がトナカイ管理を担当している。キャ

ンブ地には3つのテントが張られているほか、トナカイ用の塩場が設置されている（写真2）。日常的なトナカイ放牧作業の大部分は下の息子Vの仕事とされている。

トナカイは、基本的には柵に入れられたり、係留されたりすることなく、自由に行動しているが、一部のトナカイ（6頭）の首には鈴が取り付けられている（写真3）。

特に夜間にはトナカイの行動管理がおこなわれないため、多くの場合トナカイはキャンプ地から離れた場所に移動している。そのため、朝起きてトナカイがキャンプ地付近に見当たらない場合、まず午前中にトナカイを集める作業がおこなわれる。この作業はもっぱらS2が担当で、徒歩でトナカイ群がいると思われる方向に向かい、群を発見すると後ろから追いついてキャンプ地付近まで誘導する。

その後、日中はトナカイ群が常にキャンプ地付近にいるような管理をおこなう。トナカイはキャンプ地周辺で採餌したり、休息したり、塩場で塩を摂取したりしているが、時にテントから離れるように移動を開始する。多くの場合、移動は川に沿って上流か下流の方向に向かう。トナカイがテントから目視できなくなるくらいに離れると、Vが徒歩でトナカイ群の管理に向かい、再びキャンプ地付近に誘導してくる。日中はトナカイが移動するたびに1日数回程度この管理が繰り返される（図2）。

そして日没頃には、トナカイをテントの背後にある山地の斜面の方向に誘導する。夜間は特に管理をおこなわず、朝までそのまま放置する。

家族全員がトナカイの位置や行動には常に注意を払っており、トナカイ群の目視を頻繁におこなうだけでなく、テントのなかに居ても、鈴の音には敏感に反応している。特に午前中にトナカイ群を誘導する際には、前の晩に聞こえた鈴の音を手がかりにトナカイ群がいる位置を推測したり、実際に鈴の音を頼りにトナカイ群を捜したりしている。

Aによれば、こうした放牧方法は一年中同様で、季節による違いはなく、周囲の他のトナカイ牧畜業者も同様の管理方法を採用しているとのことである。

### 3.3 経済活動としてのトナカイ牧畜

パガダエフ共同体の飼育トナカイの内訳と屠殺数は次のとおりである（表2）。2008年までは1頭飼育頭数を増やしていたが、ここ2年は病死、自家消費、不明のトナカイが増加し、800頭台とやや頭数を減らしている。トナカイが不明になる原因として、Aはオオカミや人による捕食を挙げている。

トンゴ郡のトナカイ牧畜業者は、年に1回10～11月にトナカイを一ヶ所に集めて頭数確認および屠殺をおこない、その肉や毛皮を販売して収益を得ている。

Aによれば、トナカイ肉は1kgあたり約200ルーブル、1頭のトナカイから採れる肉は80～82kg程度なので、トナカイ1頭あたりでは約16,000ルーブルとなる。毛皮については「カモス」と呼ばれる脚の毛皮のみがブーツの材料として、1枚約500ルーブルで販売される。1頭のトナカイからカモスが4枚採れるので、1頭あたり約2,000ルーブルになる。つまり、肉と毛皮（カモス）を併せると、トナカイ1頭あたり18,000ルーブルで売れる計算になる。その他、収入に占める割合としては小さいが、角が1kgあたり約120ルーブルで売れ、値段は不明だが蹄も販売しているとのことである。

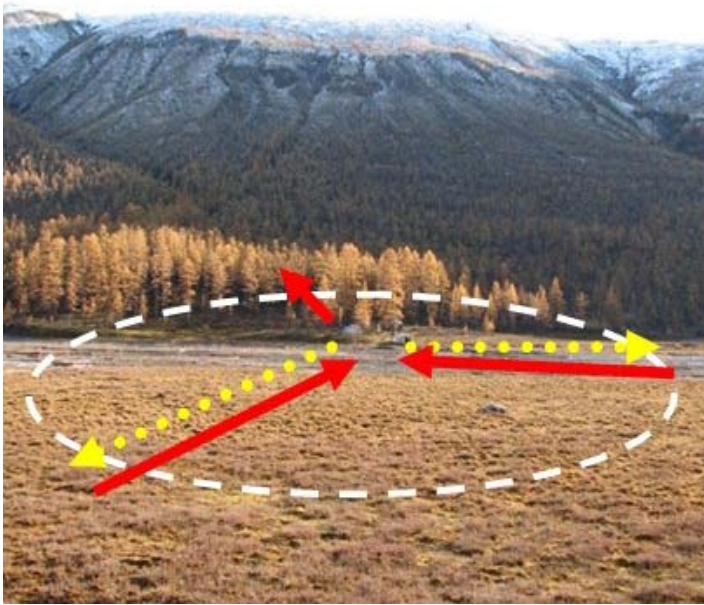


図2. トナカイの管理

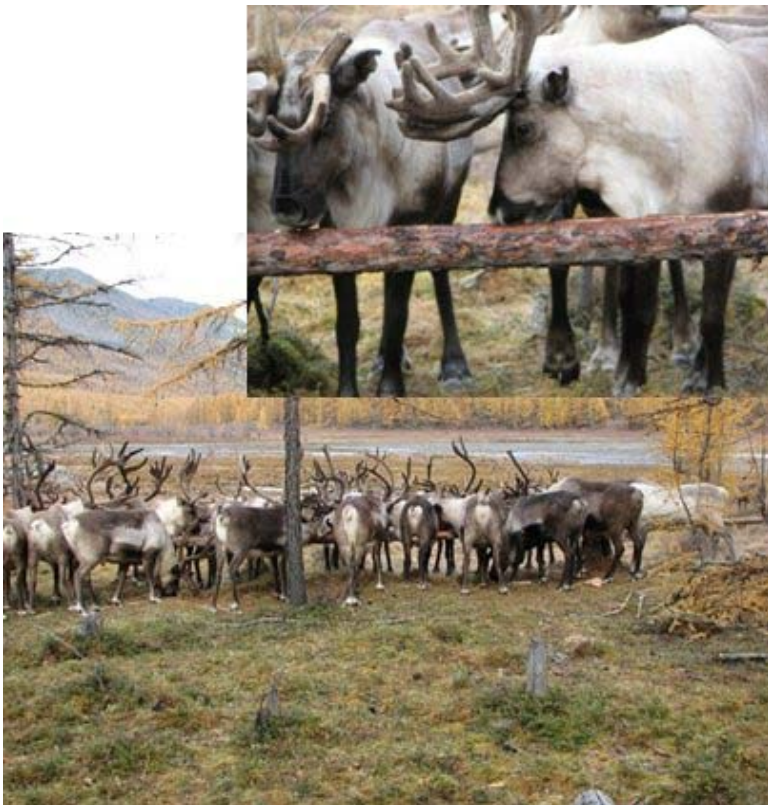


写真2. トナカイ用の塩場



写真3. 首に鈴を付けたトナカイ

表2. パガダエフ共同体の飼育トナカイの構成

年	トナカイ頭数 (1/1 現在)									損失			
	去勢 オス	種オス	3歳以上 メス	2歳 メス	1歳 オス	1歳 メス	0歳 オス	0歳 メス	計	病死	自家 消費	不明	屠殺
2003	60	6	102	17	39	37	37	76	374	13	2	-	24
2004	65	14	87	30	26	65	63	63	413	11	10	17	5
2005	170	12	216	29	65	86	82	92	752	3	6	13	39
2006	162	7	251	53	63	72	107	112	827	24	16	31	81
2007	178	23	278	58	94	102	113	97	943	21	19	19	58
2008	210	20	331	73	92	75	117	106	1024	68	68	60	64
2009	172	27	260	64	90	68	82	58	821	60	47	40	86
2010	186	40	259	55	65	46	83	77	811				



### 3.4 トナカイ牧畜以外の経済活動

トナカイ牧畜は、常にトナカイ群の側に駐在していなければならないという点で拘束時間は長いものの、トナカイ管理に係わる日常的な労働量はそれほど多くはない。実際、パガダエフ共同体でも、トナカイ放牧はおもに10歳台の少年に任されている。

そのため、特に成人男性に関しては比較的自由な時間が多く、その時間は狩猟活動に充てられている。狩猟の獲物は、野生トナカイ、シベリアビッグホーン、ヘラジカなどで、肉や毛皮を自家消費するほか、一部は売却したり、物々交換財として活用している。トナカイ牧畜に従事する者にとっては、レジャー的な要素と実益を兼ねた活動になっているようだ。

### 3.5 環境変動との関係

パガダエフ共同体のなかで、トナカイ放牧活動に従事しているメンバー3名に対し、近年の地球温暖化や環境変動、災害状況についてインタビューをおこなった。その結果、1名から崖崩れ(写真)が増えたという回答があった以外は、現状ではほとんど認識はなかった。

## 4. 考察

### 4.1 トナカイの管理について

観察結果から、トナカイの日常的な放牧は、キャンプ地周辺への誘導・維持と、日没後の自由放牧の2つの局面から成ると考えることができる。

まず、キャンプ地周辺への維持は、トナカイを常に人の近くに置くことによって、その保護・管理を容易にするための活動と考えることができる。そのため、日中はキャンプ地周辺への誘導を頻繁におこなうとともに、キャンプ地に塩場を設置したり、人の手から塩を与えたりすることによって、キャンプ地や管理する人に対する慣れ、条件付けをおこなっているものと思われる。

また、一部のトナカイには鈴を装着し、鈴音をトナカイ群全体の動きを知るための手がかりとしている。これを可能としているのは、トナカイ群の集団性の高さである。つまり、トナカイが群としてまとまって行動するからこそ、鈴音を群全体の行動を知るための指標とすることができるのである。この点は、集団性が高いヒツジ群の管理と類似している(松井 1989)。

ただ、一般的にはトナカイはヒツジほど集団性が高くはないと考えられ、他地域ではトナカイ群が放置されると数頭単位のサブグループに分かれることが報告されている(高倉 2000; 中田 2006, 2007)。この地域でなぜこうした管理が可能となっているのかは不明だが、トナカイ群の系統的な違いが集団性の違いの要因となっている可能性もある。

次に日没後の自由放牧の局面では、トナカイを積極的にキャンプ地周辺から「解放」しているように思われる。こうした管理は、サハ共和国北部においてエベンのトナカイ牧畜を調査した高倉が「解放放牧」と名付け、トナカイに特異的な家畜管理とした方法と同様と考えられる。サハ共和国内のトナカイ管理方法における共通性を示す事例であろう。

パガダエフ共同体における一年のトナカイ管理は、定住集落を中心とした冬季の管理とテントでの移動生活を中心とした夏季の管理に分けられることが明らかとなった。インタビューによれば、日常的な放牧方法には季節による違いはないとのことだった。しかし、同様の管理をおこなっていても、気候や植生などの環境、そしてトナカイの行動自体にも季節性が存在する。そのため、人とトナカイの相互作用としての放牧は、季節によって異なる展開を見せる可能性もある。本研究においては参与観察は8月、9~10月

にしかおこなわれていないため、次年度以降は時期を変え、特に積雪によって夏・秋とは食物条件が大きく異なる冬季（11～3月頃）、出産期を含む春季（4～6月頃）の状況を調査する必要があると考えられる。

#### 4.2 経済活動としてのトナカイ牧畜

インタビューおよび内部統計資料により、パガダエフ共同体におけるトナカイ牧畜の状況とその経済的価値の概要に関する情報を得ることができた。今後は、トナカイ生産物の販路や価格の変動、パガダエフ共同体の各成員の収入状況等についてより詳細な情報を収集するとともに、トンポ郡全体に関して同様の情報を収集し、経済活動としてのトナカイ牧畜の実状を明らかにしていきたいと考えている。

#### 4.3 環境変動との関係

これまでのところ、本研究では、トナカイ牧畜における地球温暖化の直接的な影響に関する認識は低いことが示されている。他の報告（Oskal *et al.* eds. 2009）やトンポ郡全体のトナカイ数が順調に増加している点からも、現時点ではトナカイ牧畜に対する地球温暖化の影響は、実際に小さいと考えられる。今後はより多くの情報を組織的に収集することによって、この結果を確認していく必要があるだろう。

グループ3では、吉田が温暖化の影響がより大きいと思われる低地でトナカイ牧畜の研究を進め、立澤が温暖化と野生トナカイの生態との関係を研究している。今後はグループ1、2から気温、降水量などの基本的な気象情報および植生の情報などを得つつ、こうした研究成果と比較・検討をおこなうことによって、トナカイ牧畜に悪影響を及ぼす条件とその影響を評価していきたいと考えている。

### 5. おわりに

サハ共和国の先住民エベンの氏族共同体におけるトナカイ牧畜の実態を明らかにするとともに、地球温暖化がトナカイ牧畜に与える影響を評価することを目的として調査を実施した。

現地調査は、サハ共和国トンポ郡にてトナカイ牧畜を営むピョートル・エゴロヴィチ・パガダエフ名称・遊牧-氏族共同体（以下、パガダエフ共同体）を対象に、インタビューと参与観察によって2009年7月27日～8月30日および2010年9月18日～10月5日におこなわれた。

その結果、トナカイの放牧管理は、12～4月にはトポリーノ村周辺で、4月～12月には約200km離れた放牧地で、キャンプ地と放牧地を8～10日ごとに5～10km程度移動しながらおこなわれていること、トナカイ・キャンプにおける日常的な放牧は、キャンプ地周辺への誘導・維持と、日没後の自由放牧の2つの局面から成ることが示された。日常的な放牧方法については、冬季（11～3月頃）と春季（4～6月頃）の状況についても調査をおこなう必要があるだろう。

また、パガダエフ共同体の成員の生活は、トナカイ牧畜によって得られたトナカイ肉や脚の毛皮の販売益のほか、狩猟による肉や毛皮の売却や物々交換財としての活用によって支えられていることが示唆された。

一方、地球温暖化の影響について、現状ではほとんど認識されていないことが示唆された。今後、より多くの情報を組織的に収集することによってこの結果を確認するとともに、グループ内外の成果と比較検討をおこない、トナカイ牧畜に悪影響を及ぼす条件とその影響を評価していく予定である。

## 6. 参考文献

- Jernsletten, Johnny-Leo L. and Klokov, Konstantin 2002 *Sustainable Reindeer Husbandry*. Arctic Council 2000-2002. Centre for Saami Studies, University of Tromsø: Tromsø.
- Oskal, Anders, Johan Mathis Turi, Svein D. Mathiesen and Philip Burgess eds., 2009 *Ealat Reindeer Herders' Voice: Reindeer Herding, Traditional Knowledge and Adaptation to Climate Change and Loss of Grazing Land*. Internatinal Centre for Reindeer Husbandry.
- 高倉浩樹 2000 「群れを放つ—トナカイ飼育における「群れ」行動統御の概念と技術」松井健 編『自然観の人類学』 pp.213-246, 榕樹書林: 宜野湾
- 高倉浩樹 2009 「シベリアの狩猟・牧畜をめぐる歴史と現代ロシア」岡洋樹・境田清隆・佐々木史郎編『朝倉世界地理講座—大地と人間の物語—2 東北アジア』 pp.301-313, 朝倉書店: 東京.
- 松井健 1989 『セミ・ドメスティケーション 農耕と遊牧の起源再考』海鳴社: 東京.
- 中田篤 2006 「タイガのトナカイ牧畜—ツァータンによる秋季の日周放牧活動—」北海道立北方民族博物館編『環北太平洋の環境と文化』 pp.105-116, 北海道大学出版会: 札幌
- 中田篤 2007 「<調査報告>秋営地におけるツァータンの日帰り放牧—家畜誘導技法と放牧中のトナカイの行動について—」北海道立北方民族博物館研究紀要 16:37-54.

# 野生トナカイの生態変化と先住民社会への影響

立澤 史郎

北海道大学大学院 文学研究科

## 1 はじめに

北極圏を中心に広域分布する大型哺乳類トナカイ *Rangifer tarandus* は、陸生動物の中では例外的に、数百から数千km に及ぶ大規模な季節移動を行う。このため気候変動にともなうトナカイの動態変化は、主要一次消費者（植食動物）として、生態系エンジニアとして、また物質・エネルギー循環の推進役として、北極圏および亜北極圏の陸上生態系に大きな影響を及ぼすと考えられる。また、トナカイの動態変化は、この動物に狩猟や畜産など生業活動の大部分を依存している北方先住民にとって、生活内容や社会構造にも影響を及ぼす大きな問題でもある。

実際、過去には長年固定的に利用されていた野生トナカイの分布域や移動ルートが、特に1990年代以降、各地で大きく変化し、それに伴って北方の生態系や景観、さらには北方先住民の生活が影響を受けたり、野生トナカイの行動圏変化（近接）による家畜トナカイとの餌をめぐる競合や連れ去り問題も各地で生じている（Jernsletten and Klokof 2002; Ulvevadet and Klokof 2004など）。

ところが、シベリア地域、特に全世界のトナカイの4割以上が生息するとも言われる東シベリア地域では、アクセスの困難さなどのために、野生トナカイの生態研究がまだほとんど行われておらず、各個体群の規模や分布状況さえ明らかになっていない（Soppela et al. eds. 2002）。

そこで本研究では、東シベリア地域の大半（ロシア連邦の国土の5分の1）を占めるサハ共和国において、今後の保全管理施策および先住民の温暖化対策の一助ともなるよう、野生トナカイの生息実態、その利用状況、それらの近年の変容について、予備調査として全域的な概況を把握した上で、特に変動が著しい地域を選定して本調査を行うこととした。

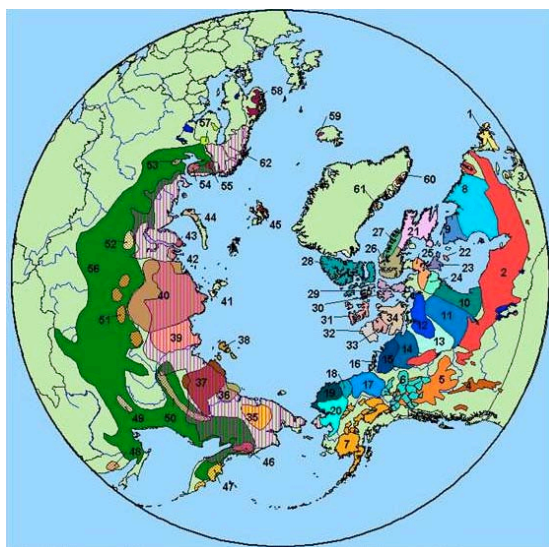


Fig.1 世界のトナカイ分布 縦縞線が家畜トナカイ、他は野生トナカイ。地域個体群毎に色分けしてある（Jernsletten and Klokof 2002 より）

## 2 調査方法・調査地・調査期間

これまでに、資料調査と社会調査（聞き取り調査）による予備調査（主に2007-2008年度）を行い、その結果を踏まえて野生トナカイの移動ルート等解明をめざした生態調査を行っている（主に2009年度以降）。

### 2.1 予備調査（概況把握）

野生トナカイの生息実態、その利用状況、それらの近年の変容に関する全土的な概要については、トナカイの遊牧や狩猟に携わり、その実態に精通しているトナカイ遊牧者、トナカイ狩猟者、および狩猟統計等を扱う専門家に対する聞き取り調査を行うことで、全域的な把握を試みた。

トナカイ遊牧者およびトナカイ狩猟者に対する聞き取りは、2008年3月末に、年一回サハ全土からトナカイ遊牧者が集まる「トナカイ遊牧者大会」の機会を利用し、その参加者に対して行った。また専門家への聞き取りは、サハ共和国自然保護省およびロシア科学アカデミーシベリア支部寒冷地生物問題研究所（IBPC）（いずれもヤクーツク市内）のスタッフに対して行った。調査期間は以下のとおり。

- ・ 2008年2月22日～3月3日：現地パートナー・研究課題に関する打ち合わせ（研究機関および関係者の訪問）および予備的面談
- ・ 2008年3月21日-4月14日：打ち合わせ、専門家聞き取り調査（IBPC、IGI、自然保護省、ヤクーツク大学、ヤクーツク農科大学）、トナカイ遊牧者大会参加および遊牧者・狩猟者への聞き取り調査。

### 2.2 衛星テレメトリー法による個体追跡調査

予備調査の結果、野生トナカイの移動ルートと分布域の変化が近年の重大かつ広域的問題であり、それが最も顕著かつ大規模に生じているのがオレニョク地域（アナバル川上流地域）であることがわかった。このため本調査は、同地域の野生トナカイの移動・分散の実態を把握するために、衛星テレメトリー法による個体追跡調査を、IBPCをパートナーとして以下のスケジュールで行った。

- ・ 2008年6月20日-7月7日：調査地と調査手法の検討、野生トナカイ衛星調査の合意（於IBPC）。
- ・ 2008年8月：捕獲許可、衛星発信機使用許可、調査許可等の申請準備開始
- ・ 2009年3月：米国GPS衛星利用不許可、GPS-ARGOSシステムからARGOS-ARGOSシステムへ変更。
- ・ 2009年9月：捕獲許可、衛星発信機使用許可、調査許可取得（各申請許可）
- ・ 2010年2月：発信機輸入許可申請不許可、発信機メーカーをロシアメーカーに変更・発注
- ・ 2010年3月：発信機輸入許可申請許可、試作発信機到着・現地試験（於・ヤクーツク農科大学附属農場）、発信機デザイン決定・発注。
- ・ 2010年7月：発注発信機（計19台）納入
- ・ 2010年8月：捕獲調査・発信機装着・衛星追跡開始

なお、上記のテレメトリー調査のデータを活用した個体群構造調査（目視観察および写真撮影による）、および当該集団の利用（狩猟）実態とその変容の聞き取り調査はプロジェクト後半年度に実施の予定である（2010年3月および同年9月に予備的な狩猟実態調査を行った）。

### 3 結果

#### 3.1 予備調査（資料調査・聞き取り調査による概要把握）

##### A. 野生トナカイの生息状況

- ・ サハ共和国内ではツンドラ地域（ツンドラトナカイ）において野生トナカイの広域個体群が5つ認識されてきたが（Fig. 1）、この10-20年の間に分布域・個体数においてそれぞれ大きな変化を示していた。各個体群の近年の動向の概況はTable 1のとおり。
- ・ 最近の統計では、全世界のトナカイ（野生4421500頭、家畜1844500頭）のうち、野生トナカイの28%（1246000頭）、家畜トナカイの74%（1357700頭）がロシア連邦におり、ロシア連邦の中では、シベリア・極東地域に、野生トナカイの9割、家畜トナカイの7割（西・中央シベリアに約5割、東シベリア・極東に2割強）が生息するとされる（Ulvevadet and Klovov 2004、ほか）。
- ・ ロシアの野生トナカイの85%は、シベリア・極東地域のなかの3か所、すなわちタイミール半島周辺（中央シベリア）、サハ共和国北部（東シベリア）、チュコト自治管区（極東）に集中している。この3か所は、広大な野生トナカイの分布面積の15%に過ぎない
- ・ 上記3か所の野生トナカイの概要は次のとおりである。
- ・ タイミール半島を中心に約60万頭（他の推定では80から100万頭）が生息するという世界最大規模のタイミール個体群は、典型的な季節移動を行う野生トナカイ個体群であり、その距離は最大1500kmにも及ぶ。唯一個体数が減少していない個体群であるが、これは、近年移動ルートが大きく内陸へと変化し、これまでトナカイがほとんど分布していなかった地域の生態系への影響が危惧されている。
- ・ サハ（ヤクート）共和国には、レナ川（レナ個体群）、ヤナ川およびインディギルカ川（ヤナ-インディギルカ個体群）、コリマ川（スンドゥロン個体群）という、北極海に注ぐ大河川の河口部と内陸を移動する3個体群が存在する。しかし、いずれも個体数が減少していてあわせても25万頭程度と見られており、特にスンドゥロン個体群は、連れ去り問題に絡む密猟や狩猟で激減して現状が把握されておらず、消滅したとも言われている。またヤナ-インディギルカ個体群も、個体数の減少に加えて季節移動のルートが急変し、トナカイ猟が成立しなくなっていると言う。
- ・ ユーラシア最東端に位置するチュコト個体群は、およそ16万頭で唯一増加していると言われ、アラスカ個体群との遺伝的關係も注目されるが、その実態は全く調査がされていない。
- ・ なお、これら北極海沿岸と内陸を季節移動する個体群は、ツンドラを中心に生息するツンドラトナカイ（*R. t. tarandus*）であるが、極東からサハ南部、モンゴル北部（ツァータン）を経てスカンジナビアにまで至るタイガを主とする幅広い地域には、別亜種であるシンリントナカイ（*R. t. fennicus*?）が生息している。この大型であり季節移動をしないとされる亜種の生態や生息状況は、ツンドラトナカイ以上にわかっておらず、両亜種が分布する地域では、特にツンドラトナカイの季節移動ルートや行動圏の変化に神経をとがらせている。

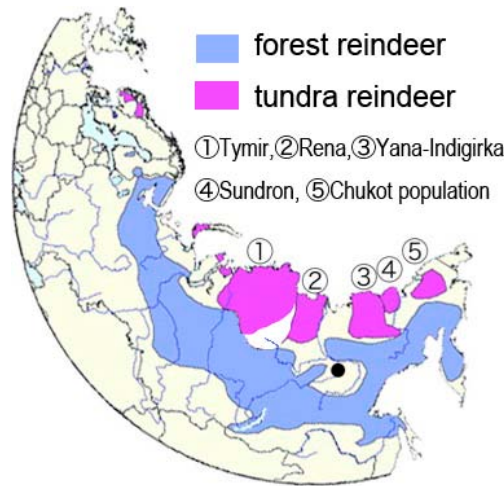


Fig.2 Wild reindeer distribution in Eurasia (●:Yakutsk)

Table 1 Wild reindeer populations in central & eastern Siberia

population	number (size, trend)	route change	period change	domestic abduction
①Tymir	quite large, →	+++	+++	+++
Upper Anabar	?, ?	?	?	?
②Rena-Olenek	large, ↓	++	++	++
③Yana-Indigirka	small, ↓	+++	++	++
④Sundron	quite small, ↓	+	+++	?
⑤Chukoto	?, ↑	?	?	+++

注) route change:季節移動ルートの大きな変化、period change:移動時期のずれ、domestics abduction:家畜トナカイの大規模な連れ去り

- 局所的に見ると、個体数が増加した地域と減少した地域があり、生息個体数自体が変化している場合と移動ルートが変化している場合があるとされるが、いずれも科学的には検証されていない。また、個体群の規模や移動ルートの把握は、これまで狩猟者への聞き取りと、一部航空機からの目視観察によって行われているが、いずれも「方向 (ベクトル)」情報の蓄積でしかなく、同一個体や同一集団の土地利用状況や移動ルートが客観的に把握された例はまだない。
- しかし、野生トナカイの変動による複数の問題はすでに先住民の間では大きな問題として認識されている。主要な問題としては、①野生トナカイの消失/減少による狩猟生業の不成立 (都市部への人口流動の要因の一つ)、②野生トナカイによる家畜トナカイの連れ去り (年間数万頭規模で生じる)、③野生集団と家畜集団の食物を巡る競争、などがある。
- 特にオレニョク地域は、本来野生トナカイがほとんど生息していなかったが、過去十数年のうちに急激な増加が見られ、トナカイ遊牧との間の摩擦が表面化している。一方、同地域西側に隣接するタイミール半島には、ロシア最大 (ユーラシア最大) の野生トナカイ個体群 (タイミール個体群) が生息するが、その東側 (アナバル側) では野生トナカイの激減が知られている。オレニョク地域はまた、プロジェクトの中心調査地であるレナ川地域の野生トナカイ (レナ川個体群) による利用が増加しているとも言われる地域である。す

なわちオレニョク地域とその周辺では、野生トナカイの大規模な消失と出現が隣り合って生じており、またトナカイの生態変動による諸問題が顕在化しており、かつ、レナ川個体群とタイミール個体群の合流実態解明など、保全管理上緊急を要する課題を要していることがわかった。

#### B.トナカイ飼育先住民の変動認識

- ・ 今回のトナカイ牧者全国会議（2008年3月31日-4月3日、於トンポ）では、サハ共和国の行政区（5市と33のウルス）のうち、エベンを主とする北方の14ウルスの代表者約80人を含む約200人が集まった。4日間の会期中、各ウルス1-4名の代表者、計約25人にインタビューを行った（写真1）。
- ・ 14ウルス中12ウルスの代表者が、近年の目立った天候変化を指摘した（主に温暖化、他の2ウルスは「変化なし」）。その具体的内容は、融雪・解氷の早まり、凍結の遅れ、降雪量の増加、冬期の降雨（による地面凍結）、などであり、それに関連した心配事として、「人や物資の移動の妨げ」、家畜トナカイの「移動の阻害」や「怪我・死亡」、「食物不足」、野生トナカイの出現による家畜トナカイの連れ去り、野生トナカイの減少による狩猟不調、植生構造の変化、病気の感染、などがあった。
- ・ “寒極”と称されるオイミヤコンの代表者（夫婦）は、道路を車が通れる期間が短くなったため販売物の輸送コストが上がり、逆に肉製品などの質が落ちて、夫の年間収入がこの2-3年で半額近くに落ち込んだ。今回（3月末）もすでに融けはじめた場所があって、トナカイを渡すのが大変で帰路の心配をしていた。
- ・ ツンドラの植生は脆弱で、特にトナカイが好むトナカイゴケ（地衣類）は、生育場所が限られる上に再生に数十年かかるといわれるので、気候変化や野生トナカイによる利用で採食地の数や質が変化すると非常に困る。ただでさえ、草地の種構成が急速に変化している。遊牧の場合、ミクロな採食場所や食物は基本的にトナカイが決めるが、例えば川が融けて渡れなくなると、迂回して移動コストが増し、十分な餌が確保できなくなり、最悪の場合は個体や集団を再発見できず失ってしまう。採食地間や居住地への移動時に従来のルートが通れないこともしばしばで、時間・労力・経済的なロスが生じている。まだ暖かな初冬（10月）や晩冬（4月）に降った雪が、気温や降水により融けた後に凍結する問題を挙げるウルスが多かった。この場合、トナカイや馬は餌をとれず、餓死に至るケースもあるという。このような高湿の冬（と乾燥した夏）は、人・植物・トナカイのいずれにもストレスになり、蚊の発生期間や場所が増えることへの不安もあった。
- ・ 二つのウルスでは特に変化なしとの回答であり、温暖化による植物の増殖に期待しているとの声もあった。
- ・ 近年の少数民族政策の基本は伝統文化の復興であり、そのために移動学校など遊牧生業の支援が行われつつあるが、トナカイの行動の予想がつかなくなったり経済的利益が減少すると、遊牧や移動しながらの狩猟は難しく、移動学校も成立しにくい。トナカイの狩猟や飼育で生活できない人の一部は、ソビエト崩壊直後のように天然資源の採掘場や都市へ出稼ぎに行かざるを得ない。
- ・ 少なくとも地域的な気候変動と、それによる先住民族のトナカイ生業や生活への悪影響（の認識）は既に生じており、その影響は社会のあり方にまで及びつつある。複数の行政担当者は、先住民族政策の根幹を揺るがすとの認識を持っていた。

### 3.2 衛星テレメトリー法（Argos-Argosシステム）による個体追跡調査

#### A 調査地の検討

- ・ 予備調査等の情報から、過去十数年のうちに最も大規模な変化が起こっている場所として2か所が上が



った。1か所は、ほとんどトナカイがいなくなったとも言われるスンドロン個体群 (Fig. 1 の④)、もう1か所は、急激な増加が見られ、現在は野生トナカイの新たな分布域となって、トナカイ遊牧との間の摩擦 (連れ去りや食物の競合など) が表面化しているオレニョク地域 (アナバル川上部域) である (Fig. 1 では①に含まれて示されている)。アナバル川上部域は、かつて野生トナカイがほとんど生息していなかったが、西側のタイミール半島にはロシア最大 (ユーラシア最大) の野生トナカイ個体群 (タイミール個体群) が、東側には広域に分布するレナ川個体群が隣接する。タイミール個体群は、その生息地 (行動圏) が大きく内陸側 (南東方向) にシフトしていると言われ、一部はアナバル川河口部を渡ってサハ共和国内、アナバル川上流部にまで移動していると考えられる狩猟者もいる。

- このアナバル川上部域は、ほとんどいなかった野生トナカイの急増による植生変化の問題や家畜トナカイ (トナカイ遊牧) との軋轢、そして国境部であり複数の先住民族の利用境界ともなっているために、温暖化が引き金となった資源利用問題を包含しており、資源動物である野生トナカイの実態把握と合理的管理体制の構築が急がれる場所である。そこで本研究では、このアナバル川上部域を主調査地とし、秋期 (8月後半から9月前半) に季節移動のため渡渉する個体に衛星発信機を装着・放逐し、移動ルート等を把握することで、本地域と東西の隣接個体群 (分布域) との関係や、生態変化の原因を明らかにすることとした。

## B 調査方法の検討と検証(動作試験)

- 現在、世界的に用いられている衛星による野生動物定位システムは米国の GPS を用いて定位し、その情報を ARGOS 衛星 (およびフランスのセンター) 経由で取得する方式 (いわゆる GPS-ARGOS システム) である。本研究でも実績のある本システムの利用をめざし、IBPC の尽力で厳しいロシア国内での GPS 利用の許認可条件をクリアしたものの、最後の発信機輸入段階で政府機関からクレームが付き、不可能 (すなわち、GPS は使えるが、GPS-ARGOS システム用の発信機は使えない状態) となった。
- このため、測位方式の違い (ARGOS 衛星による測位はドップラー測位方式) のため精度が一桁落ちると言われる ARGOS-ARGOS システムを採用し、しかも実績のほとんどないロシア国内のメーカー製発信機 (ES-PAS 社、モスクワ) を用いざるを得なくなった。そこでまず 2010 年 3 月に、試作品をヤクーツク農科大学附属農場で遊動する家畜トナカイに装着して現地試験することとした。見地試験は約 1 か月間、約 10 分に一回の測位を行い、目視による実際の位置と取得データとの差異も検討した。
- その結果、少なくとも疎林においては ARGOS 衛星による発信機 (トナカイ個体) の測位に問題はなく (取得率 85% 以上)、かつ既知の位置情報に基づく取得データの位置精度の検証では、草地およびブッシュ (好条件) で 0m-200m、森林部 (悪条件) で 50m-500m、谷部の森林 (極悪条件) でも 250m-1200m と、移動ルートの解明においては十分実用に耐えるものであった (Class 0-3 のデータを使用)。ちなみに、ARGOS 衛星 (ARGOS システム) を運用する SLC 社の公表精度は、首輪から一度に 4 回以上の送信波を受信することで精度 (確度) の推定が可能な Class 3、Class 2、Class 1、Class 0 がそれぞれ半径 250 m 未満、500 m 未満、1500 m 未満、1500 m 以上であり、公表値と同等、もしくは実測精度の方がやや良好であった。これは、ARGOS 衛星が極軌道を周回するために、高緯度地方でより測位精度が高まること、障害となる密な森林が少ないこと、などが理由と考えられる。
- その後、動作試験等の結果を参考に、アンテナ位置、首輪素材、留め具等の改善指示を行い、最終的なデザインをメーカーに発注した。このメーカー (モスクワ) は、ロシア初の衛星発信機メーカーであり、ホッキョクグマ用衛星発信機の作成を昨年手から手がけ、トナカイ用は今回、IBPC との共同研究の形でいい、捕獲調査にも立ち会った。



Fig.3 Argos-Argos 衛星発信機付き首輪の試作品



Fig.4 発信機付き首輪の装着風景

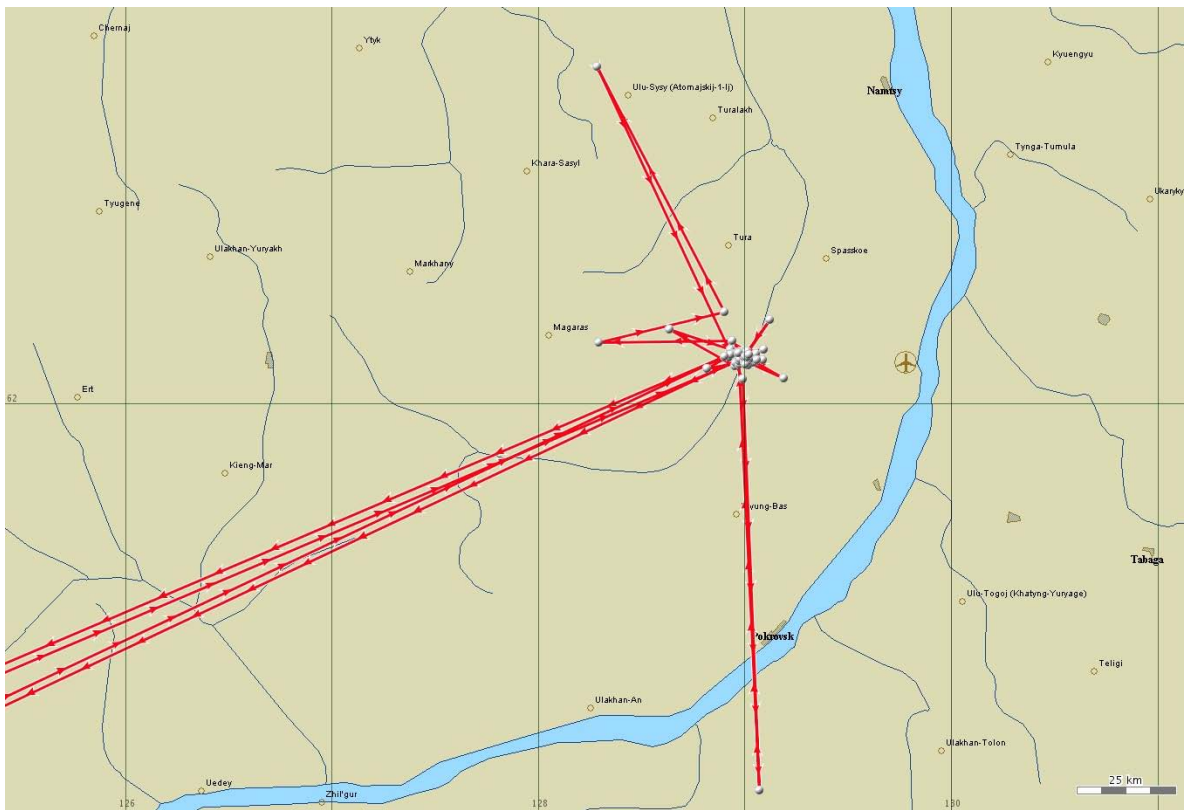


Fig. 5 動作試験データによる位置表示  
 集合部分(農場)以外のポイントは全てクラス A およびクラス B のデータによる



Fig.6 Research area (Olenek district and Anabar river) Capturing was carried at upper Anabar river area.

### C捕獲・首輪装着・追跡開始

- 2010年8月12日～26日の間、プロジェクトメンバーであるE.Killirinを隊長とした捕獲隊を結成、アナバル川を2隻のボートで下りながら渡渉中のトナカイの捕獲を行った。実際の探索・捕獲は13日～22日の10日間で、この間の総合計移動距離は約500km、5地点で合計15頭を捕獲し、発信機を装着した。
- 捕獲・発信機装着個体の内訳は、オス7頭(2-8才)、メス8頭(2-7才)の計15頭で、成長による首輪のトラブルが予想される0-1才、および不健全な個体の捕獲は避けた。
- 残りの発信機5台は、4台を冬期捕獲用、1台(試作品)はジャコウウシ用として使用しなかった。
- 同年9月1日-5日に、IBPCにおいて、立澤立ち会いの下で、電波取得状況・データ内容の確認を行い、十分な定位と予定通りのデータ内容の取得が行われていることを確認した。
- その後、10月末までに、成オス2頭がほぼ移動しなくなったため、地元協力者により発信機が回収された。移動しなくなった理由は発情期の闘争による衰弱だった。このため、12月10日時点で追跡中の個体は計13頭(オス5頭、メス8頭)となった。捕獲・発信機装着個体の一覧をTable 2に示す。
- なお、現在北極圏ツンドラにおける最優先保護種(絶滅危惧I類)であるジャコウウシ(musk ox)の野生個体群が、サハ共和国政府によりアナバル川下流域の低地帯に再導入されており、野生トナカイとの食物等を巡る競合が危惧されている。このため、この野生ジャコウウシ集団(現在100頭近くと目される)中の成獣1頭に試作発信機1台を装着し、野生トナカイとともに挙動を追跡することにした。

Table 2 A list of satellite-collared animals

individual ID	area	species	sex	age	
61880	upper anabar river	reindeer	male	8 age	-1/2×
61928	upper anabar river	reindeer	male	5-6 age	-1/2×
61927	upper anabar river	reindeer	male	2 age	
61903	upper anabar river	reindeer	male	4 age	-1/2×
61933	upper anabar river	reindeer	male	6-7 age	
101119	upper anabar river	reindeer	male	2 age	(-10/31 not work)
101118	upper anabar river	reindeer	male	8 age	(-10/31 not work)
61904	upper anabar river	reindeer	female	2 age	-1/2×
61913	upper anabar river	reindeer	female	2-3 age	
101120	upper anabar river	reindeer	female	3 age	with 1 child
101121	upper anabar river	reindeer	female	5 age	with 1 child
61879	upper anabar river	reindeer	female	6 age	with 1 child /-1/2×
61916	upper anabar river	reindeer	female	6-7 age	with 1 child /-1/2×
61929	upper anabar river	reindeer	female	6 age	with 1 child
61930	upper anabar river	reindeer	female	2-3 age	
50748	lower anabar river	musk ox	?	?	



Fig.7 Anabal川上流部を渡渉する野生トナカイ



Fig.8 捕獲風景1(投げ縄で捕捉)



Fig.9 捕獲風景 2(作業のため岸に引き揚げる)



Fig.10 捕獲風景 3(発信機の装着)



Fig.11 放逐直後の発信機装着個体(麻醉覚醒中)

#### D 取得データ

- 2010年8月17日から同年12月10日まで(116日間)に、16個体分の位置データを総計約118000データ(平均1個体1時間あたり2.6回の位置データ)を得た。現在解析した10180データで見ると、このうち位置情報として使用可能な(精度推定がされた)クラス0、1、2、3のデータ数はそれぞれ、441(4.3%)、1859(18.3%)、3258(32.0%)、2461(24.2%)で、位置情報解析用の使用に耐えないクラスA、Bはそれぞれ、1236(12.1%)、925(9.1%)であった。特に精度が高く一般的に移動解析に用いられるクラス2以上のデータが半数以上(54.6%、5558/10180;1個体1時間あたり1.15回測位)を占めたことから、本方式は野生トナカイの移動追跡手法として実用に耐えうると判断された。

#### E 移動経路

- 2010年8月から同年10月日までの期間のクラス2以上のデータにより描かれた各個体の移動経路をFig.12に示す。
- 衛星発信機(首輪)を装着した野生トナカイ15頭のうち、オス2頭は発情期の闘争と思われるトラブルで発信が停止。残り13台は12月10日現在まで追跡中である。
- 追跡中の13個体の移動経路は、明瞭に2つの傾向を示した。すなわち、4頭は北東方向への移動(Northern Migration Group:NMG、Fig.12)、9頭は南方向への移動を続けた(Southern Migration Group:SMG、Fig.13)。どちらのグループも、各個体は異なる場所で捕獲・放逐したにもかかわらず、それぞれ非常に類似した移動経路をたどっており、同じ夏期のレンジ(越夏地)をもつ集団が、越冬地の選択において明瞭な2グループに別れた(もしくは異なる越冬地を持つ2集団がおなじ越夏地を利用している)と言える。
- ただし2集団とも、途中は前後左右に幅広く分散して移動しており、これまで野生のツンドラトナカイで報

告されているような高密度の大集団を形成せず、NMS で幅 50km、SMS では 100-150kmにわたる分散型の移動様式を示した。

- また、北行集団(NMG)は 11 月に入っても移動を続けたが、南行集団(SMG)は 10 月下旬には長距離移動でなく定着的な行動を示し、すでに越冬地に到着したものと考えられた。すなわち、SMG は捕獲地点から約 500km の移動で森林地帯(タイガ)に越冬地を得たのに対し、NMG は 1000km以上移動をしつづけてレナ川河口地帯(Pronchischev's Mountain Ridge)にまで到達してまだ越冬状態に入っていない。
- なお、SMG についてはいずれの個体も迂回行動のような大回りのルートをとってレナ川上流域近くに到達しているが、この「迂回」の理由はまだ不明である。

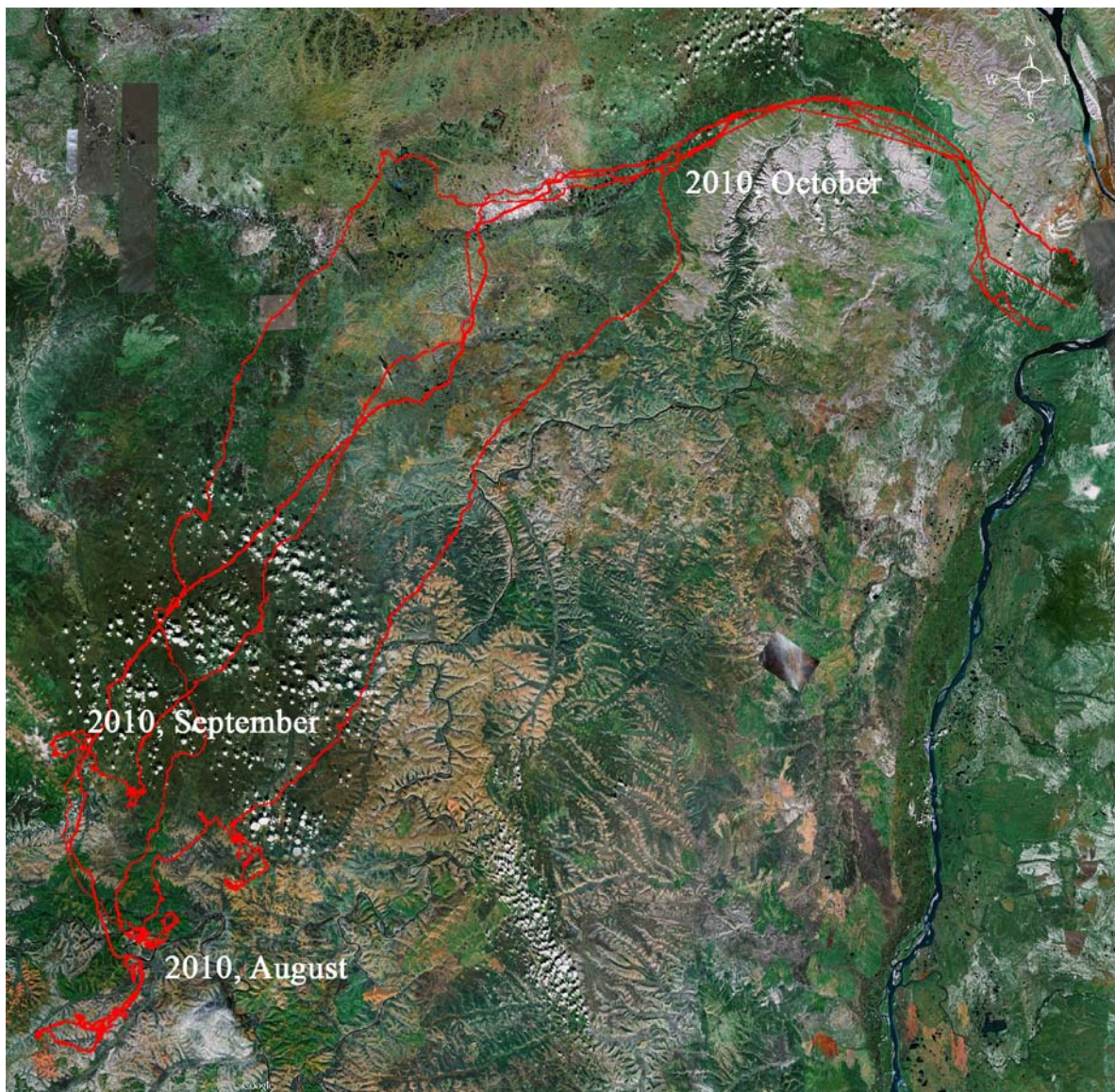


Fig.12 NMG の季節移動経路(2010 年 8 月～10 月)



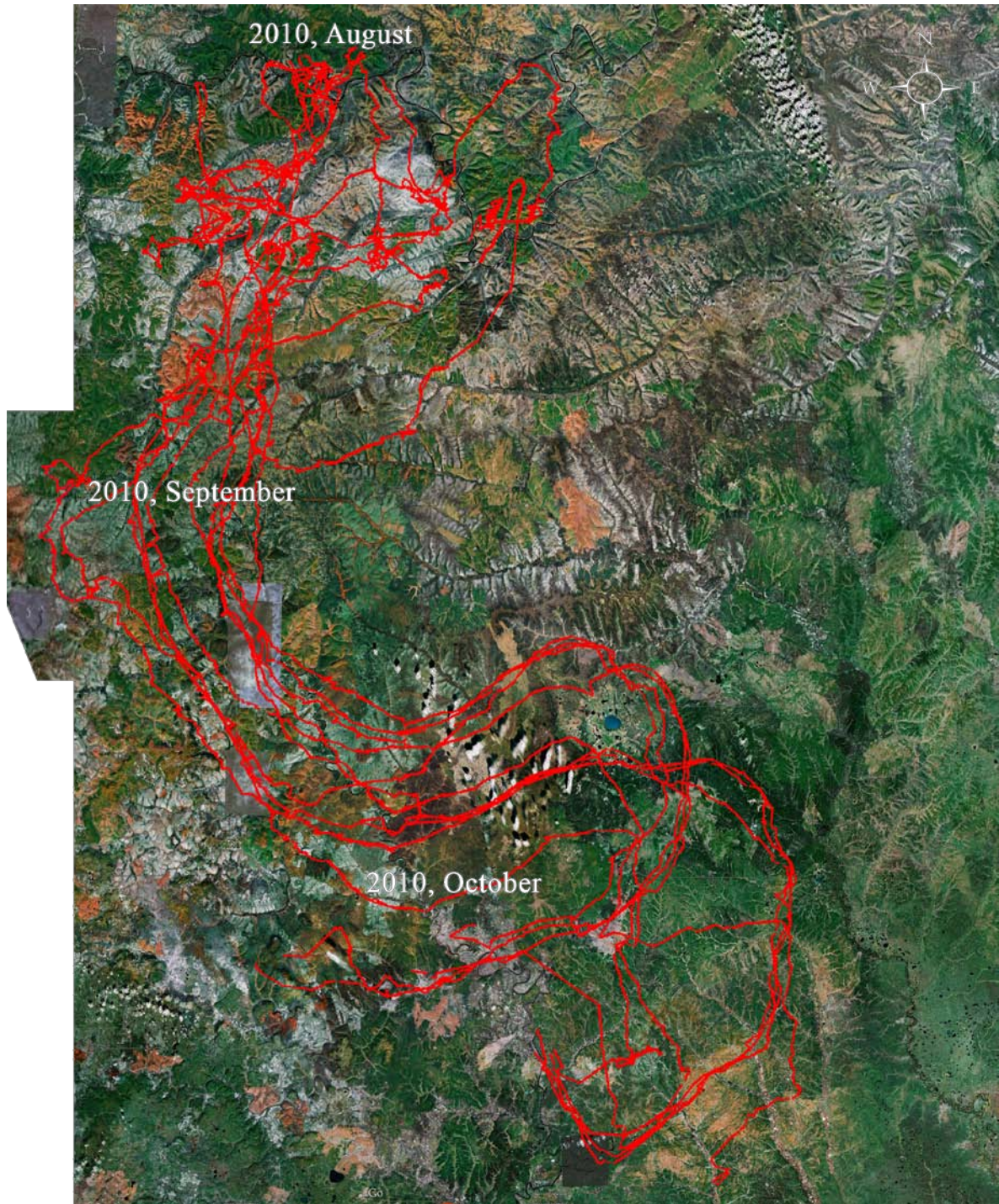


Fig.13 SMGの季節移動経路(2010年8月～10月)

## 4 考察

### 4.1 予備調査

- ・ サハ共和国の環境変動およびそれに対する北方先住民の認識については、トナカイ牧者全国会議の機会等を活用することにより、概要ではあるが全域的な傾向をつかむことができた。いわゆる温暖化の影響があるという場所とないという場所が混在するが、より冷涼な気候、特に山岳地や河川流域で強く影響が認識されていると思われた。これはすなわち、積雪・降雨など動的な水環境の影響を受けやすい地域であるためと考えられる。
- ・ 資源動物の動態については、特に野生トナカイの全国的動態を把握できた。

### 4.2 衛星テレメトリー法による個体追跡調査

- ・ ロシアで初めての衛星テレメトリー技術を応用した野生トナカイのトラッキングシステムを確立し、実際の追跡に成功した。このシステムは、一部、絶滅危惧種であるジャコウウシの野生導入個体群にすでに応用されているが、同国における野生動物研究に広く応用できる。
  - ・ また、このシステムを用いて、最も変動の激しいアナバル川上流域の越夏集団が、少なくとも2つの対照的な越冬地をもつこと、南向集団はタイガ地帯に越冬地を持つこと、などを明らかにした。
  - ・ 特に南向集団の越冬地への移動は通常の場合よりも早く始まり早く終わった。アナバル川上流域は、10月初頭の温暖化と降雨量の増加が顕著な場所だといわれており（IBPC 情報による）、その後の地面の氷結を避ける結果となっていると考えられる。
  - ・ ただしこの南向集団の挙動は、気候変動による移動の困難さに対する適応がすでに生じているという解釈意外にも、元々越冬場所までの移動コストの少ない集団であった可能性もあり、過去の狩猟者の記録・記憶との照らしあわせなどを含めた検証が今後必要である。
  - ・ なお、今回明らかになった2集団による同一越夏地の利用の事実は、野生トナカイ保全の上で大きな意味を持つ。なぜならば今回の結果は、東西に隣接する2大個体群（レナ川個体群とタイミール個体群）が新たな越夏地であるアナバル川上流部において合流している可能性、もしくは、北方から越夏に流入してくるツンドラトナカイと、タイガ地帯を利用する別亜種シンリントナカイが交雑している可能性が考えられるからである。特に後者の問題は、同地域の野生トナカイをどのように保全すべきか否かという“conservation dilemma”をかかえており、捕獲時に採取しているDNA分析サンプルを活用し、早急に確認して対処指針を提言する必要がある。
  - ・ 今後はこれまで全く不明であった東シベリアの野生トナカイ個体群の周年移動ルートが明らかになると期待される。
  - ・ また捕獲調査（体サイズ・絶対年齢・妊娠率等の情報収集）に加え、観察調査（集団サイズや個体群構成の情報収集）を、現地の先住民狩猟者等の協力を得て行う体制が構築されたので、今後さまざまな野生動物の生活史パラメーター等を含めた調査研究に活用することが期待される。
- 
- ・ 今後の課題としては、以下の項目が挙げられる。
- ① 個体追跡の継続と測位データの量的解析。
  - ② 追跡個体を含む集団の現地における目視観察（現地協力者等による）とその情報を用いた集団構成や行動・食性等の解析（質的解析1）。
  - ③ 既存の植生・地形・気候データなどとの重ね合わせによる移動・越冬・越夏の要因解析（質的解析2）。
- ・ またこれらの成果は、アナバル川上流域で生じている家畜トナカイと野生トナカイとの軋轢（連れ去り問

題、希少植物の採食問題、そして北方先住民、特に野生トナカイ狩猟者の狩猟地確保とトナカイ保全地区（出産育仔地域、越冬地域）デザインの検討などの保全課題に積極的に活用できるようなデータセットに加工する必要もある。

# サハ共和国における毛皮獣狩猟と外来生物問題

池田 透

北海道大学大学院 文学研究科

## 1 はじめに

ロシア連邦サハ共和国の首都であるヤクーツクは、長い間東シベリアにおける毛皮の主要産地であり集積地であった。しかし、旧ソ連崩壊による政治経済システムの変化によってサハ共和国の毛皮獣狩猟も大きな影響を受けることとなった。経済の自由化に伴ってイタリア、ギリシャ等のヨーロッパ諸国や中国から格安な養殖ミンク毛皮が流入することとなり、河口に手間がかかり高価な野生毛皮獣需要は低下し、毛皮の価格は暴落した。さらにインフレが追い打ちをかけて銃・弾等の狩猟用具価格も急騰し、生業としての毛皮獣狩猟は成り立たない状況に追い込まれた。ソフホーズ・コルホーズによる集団狩猟体制は崩壊し、1990年代半ばには野生毛皮獣狩猟は年金生活者の小遣い稼ぎや余暇として行われる程度に衰退し、海外からの狩猟者誘致や彼らのガイドを行うことで事態を開朗することすら検討されるに至った (Ikeda 2003)。規模は縮小され、年金生活者の小遣い稼ぎへと衰退してきたシベリアの毛皮獣狩猟ではあるが、主産業ではないマイナーサブシステム (松井 1998) として営まれる中にも卓越した技術と創意工夫を見ることができた。狩猟対象動物に警戒感を与えないために周囲の環境に合わせて倒木や冬期間には氷で作った罠などを用い、また捕獲した動物の死体処理の手法や儀式などにも動物の生命に対する崇拝の様子も垣間見られ、シベリアにおける毛皮獣狩猟の歴史の重さと人々と動物との関係の深さを感じざるを得なかった。温暖化の影響よりは経済に翻弄されたシベリアの毛皮獣狩猟ではあるが、サハ共和国政府も伝統的な狩猟の存続と再活性化には力を注いでおり、持続的な資源利用の範囲内での健全な狩猟活動の再興が待たれるところである。

以上のような変遷を遂げたシベリアにおける毛皮獣狩猟ではあるが、本報告では、サハ共和国における近年の毛皮獣狩猟の動向と、温暖化が毛皮獣狩猟に与える影響及び関連する諸問題を明らかにすることを目的とする。今回は特に社会的にも浸透してきた生態系保全という観点から、従来の毛皮獣狩猟のための外来毛皮獣の導入について、気候変動の影響及び社会的認識の変遷について焦点を当てて考察を試みる。

## 2 研究対象地域と方法

本研究における調査は、ヤクーツクを中心とした毛皮獣に関する資料収集・聞き取り調査と、ヤクーツク近郊の外来毛皮獣マスクラット及びキツネのワナ狩猟における参与観察及・聞き取り調査を実施した。ヤクーツクにおける資料調査は科学アカデミー生物学研究所を中心に行い、1996年-2006年までのサハ共和国毛皮獣狩猟頭数データ、マスクラット放獣時期・地点に関する情報と現在の分布情報、狩猟関連法令及びヤクーチア版レッドデータブック (改訂版) 等を収集した。また、生物学研究所の前マスクラット研究者 (サハにおけるマスクラット研究の第1人者) ユーリ・ルーコブツェフ氏から、マスクラット導入の経緯、生息状況及び外来種としてのマスクラット問題に関する聞き取りを行った。

参与観察・聞き取り調査については、ナムスキー地区で行っているマスクラット・キツネワナ猟に同行した。マスクラットワナ猟については、クトゥバル地域のマスクラットが生息する小さな湖 (長径約 150m・

短径約100m)で、キツネワナ猟についてはタローノ地域のケンケメ川沿いで実施し、同行したハンタークラブ「ノース・サファリ」ジェネラルディレクターのイノケンティ・セメノフ氏、地区レンジャーのロンギン氏などにマスキラット及びその他毛皮獣狩猟一般に関する聞き取り調査を行った。



写真1. クトゥバルでのマスキラットワナ狩猟



写真2. 狩猟に用いたカゴワナと捕獲されたマスキラット



写真3. ケンケメ川沿いに仕掛けられたキツネワナ

### 3 結果

#### 3.1 現在のヤクーチアにおける毛皮獣狩猟について

ヤクーツクの科学アカデミー生物学研究所では、1996年-2006年までのサハ共和国毛皮獣狩猟頭数データを入手することができた。

表1. 近年のヤクーツクにおける毛皮獣狩猟頭数の変遷

	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006
クロテン Собо́ль	19655	20074	27011	27805	32000	38741	30302	36485	38780	43065	42647
キタリス Белка	100464	136200	118982	58305	31802	41885	116657	106508	45740	64592	88296
イタチ Колонок	418	867	942	1321	1944	4940	3124	2148	2304	1667	1808
オコジョ Горноста́й	12201	17419	8364	13913	14507	14983	10292	8146	5821	7897	7955
キツネ Лисица			119	157	156	100	50	71	77	190	378
ユキウサギ Заяц-беляк	456	44	29	69	647	1062	1722	5319	5656	16552	34047
クズリ Росомаха			36	88	141	115	87	105	54		22
オオヤマネコ Рысь			7	7	7	2	2	5	1		
オオカミ Волк	1062	1150	881	811	675	739	771	878	727	693	487
ホッキョクキツネ Песец	1069	622	1477	1648	605	849	476	1379	1055	905	2538
マスカラット Ондатра	142367	117734	161681	187995	164729	192689	103501	225163	176899	180273	247818

狩猟統計をみると、一見ユキウサギの捕獲数の増加やマスキラットの捕獲数の多さも見て取れることもできるが、これらは毛皮獣としての価値が回復し、毛皮獣狩猟に復興の兆しが見えてきたというわけではなく、生態系保全のための野生動物管理の一環として行われている狩猟であるということが聞き取りによって明らかとなった。

ユキウサギの場合は、個体数密度が過度に高まると感染症等が発生した場合に大量死につながるおそれがあり、それを回避するための欧米流の野生動物管理学における個体数調整の一環として捕獲数が増加したための現象となっている。

マスキラットについても、他の動物に比較すると高いレベルでの一定数の捕獲が継続しているように受け取れることもできるが、これも旧ソ連時代に比較すると捕獲数は圧倒的に少ないという。ヤクーツク北東のコリマ川流域では、旧ソ連時代には約 100 人のハンターがいて、1 ハンターが 1 シーズンに 5000 頭のマスキラットを捕獲していたといい、さらに取り扱い数が把握できないブラックマーケットも存在しており、多いときでは 100 万頭のマスキラットが捕獲されていたと推定される。

毛皮の売値も低いままで推移しており、クロテンで一枚が 2000~3000 ルーブル、大型のオオカミで一枚が 10000 ルーブル、マスキラットでは一枚が 50~85 ルーブルでしかない。よってプロフェッショナルなハンターは相変わらず少なく、毛皮獣狩猟は無職者の小遣い稼ぎという状況に変化はない。

### 3.2 マスキラット狩猟及びキツネその他の狩猟

マスキラットの狩猟は、主に毛皮の質がよい冬期間に行われる。この時期はマスキラットの生息する水辺は氷で覆われるため、マスキラットは氷の下を泳いで移動することとなり、その移動ルートを見つけてワナを仕掛けることで効率の良い捕獲が期待できる。

マスキラット猟では、まずマスキラットの冬の餌場を見つけることから猟が開始される。その場所が餌場かどうかについては、落ちている草の食痕を見て識別し、さらにイヌを用いてマスキラットの息つぎ用の穴を見つけてそこにカゴワナを仕掛ける。冬期間の氷の厚さは 1m 以上にもなり、マスキラットは息つぎ穴を作って呼吸をするが、その息つぎ穴をイヌが臭いによって判別する。マスキラットは息つぎ穴を頻繁に利用するため、よく使われる息つぎ穴には毛皮をかけて穴が塞がらないようにして繰り返しワナを仕掛ける。ハンターらの話では、マスキラットの数は増えてきているが、質に関しては不明で、逆にサイズは小さくなっていると認識されている。

キツネに関しては、トラバサミを氷を積み重ねた台の上に設置してその上に誘引餌となる腐肉付きの馬毛皮を木でぶら下げるものであった。氷を積み重ねるのは、キツネが興味を持ち、雪に埋もれずに目立って場所が分かりやすいからとハンターは理由を説明してくれたが、確かにキツネは突起物等の目立つ場所に興味を惹かれ、尿などでマーキングする習性があり、こうした野生動物の習性をハンターはやはりよく理解している様子がうかがえた。

### 3.3 マスキラットの持つ二つの側面 —毛皮獣と外来生物—

ところで、マスキラットはもともとこの地域には生息しない外来生物である。マスキラットは体長三十センチメートルほどの泳ぐネズミであり、繁殖力が高い上に、水中生活に適応しているために毛皮の質も良い。毛皮生産増大のためには格好の動物であり、サハ共和国においても 1930~1931 年の導入以来、広範囲に定着が見られている動物である (Long 2003)。良質で安価な毛皮ということで製品として加工されることも多く、ヤクーツクの町の中でもマスキラットの毛皮の帽子はよく見かけることができる。

旧ソ連時代から毛皮はシベリアの重要な産業であり、その中心的存在は良質な毛皮を持つクロテンであったが、優秀な狩猟技術を持つ少数民族が多く住むシベリアでは、さらに毛皮獣を外部から導入して増殖

を図り、さらに毛皮の増産が図られた経緯がある。その中の一種がマスクラットであった。北米アラスカなどの寒い地域の原産であり、ネズミの一種のために繁殖力も強く、毛皮も良質であるためにシベリアに導入する毛皮獣としては適していると考えられ、シベリア各地に広く導入された経緯がある。

ハンタークラブ「ノースサファリ」のジェネラルディレクターであるイノケンティ・セメノフ氏への聞き取りによると、1930～1932年の3年間にカナダから57頭、フィンランドから63頭のマスクラットをサハ共和国に導入したといい、1940年代にヤクーツクから140km離れた地点で34頭のマスクラットを放獣したこともあるという。現在は毛皮の価値が低下しているが、マスクラットの毛皮は中国からの需要があるので相変わらず狩猟は行っているとのことであった。

また、ヤクーチアにおけるマスクラットの専門家であるユーリ・ルーコプツェフ氏からの聞き取りでは、旧ソ連時代には毛皮の価格が高く、個体数もそう多くはなかったので重要が高く、捕獲数も多かったという。北東ヤクーチアのコリマでは100人程度のハンターが1シーズンに1人当たり5000頭の捕獲を行っており、さらにブラックマーケットも存在したことから100万頭ものマスクラットが捕獲されたのではないかという。現在では毛皮価格も低迷し、市場の関心も低いために需要が無く、無職者の小遣い稼ぎ程度の狩猟しか行われていないという。

マスクラットも十分に広がり、また需要もないので現在はマスクラットの放獣は行ってはいない。それどころか、毛皮獣の価値が以前より低くなってきた現在では逆に最近では、マスクラットの外来生物としての負の側面が意識されるようになってきている。ルーコプツェフ氏の話では旧ソ連時代にも個体数の調整は行っていたが、現在はマスクラットが環境に与える影響を防ぐことの必要性が強く認識されているという。その影響とはマスクラットが土手に穴を開けることによって洪水を助長する問題であり、春にレナ川の氷が融けることによる洪水に悩まされるヤクーツク周辺にとっては大きな問題である。科学者のみならず人々もマスクラットのこうした影響については危惧しているという。現在の生息数コントロールはワナと銃による狩猟のみで、期間も11月から4月の間だけに限られているが、春に集中的に捕獲することがコントロールには効果的であると予想されており、生物学研究所の情報では現在サハ共和国政府はマスクラット管理政策を検討中とのことで、研究費の準備も進められているという。

### 3.4 マスクラットの定着と気候変動との関係

マスクラットは湖沼や河川でイネ科の植物などを利用して巣を作ったり、土手に穴を開けて巣を作ったりするが、移動は基本的に水の中であり、冬期に水底まで完全凍結してしまう場所では生息することができない。マスクラットの冬の移動ルートは氷の下であり、氷の下を泳いで巣や餌場を行き来するのだが、寒さで水底まで結氷してしまうと移動が不可能となって生活することが不可能になってしまう。マスクラットは泳ぎが得意で水中生活に適応しているが、そのために冬においては氷の下の移動ルートの確保は彼らにとっての死活問題であり、実際にサハ共和国の中でも寒さの厳しい北部地域での導入は失敗に終わっている。過去に毛皮獣狩猟の調査を行った北部のエベノ・ブイタンスキー地区では、数回のマスクラット放獣が行われたが、厳しすぎる寒さのためにマスクラット導入は失敗に終わったことが聞き取りで明らかとなっている。

シベリアで温暖化が進めば、冬期の結氷の厚さにも影響が出ることが予想され、そのことはマスクラットの定着域拡大につながることを予想される。また、温暖化と開発の相互作用によって増加が問題となっているアラスカなどもマスクラットの格好の生息地になることが予想され、コントロールが必要となってきたマスクラットの生息を助長するような状況が想定される。



## 4 考察

### 4.1 毛皮量産から生物多様性保全へ

マスカラットは世界的にも侵略的外来生物として有名な存在である。原産地は北米であるが、1905年にチェコスロバキアの皇太子が北米旅行の記念としてアラスカから5頭(オス2頭・メス3頭)を持ち帰り、プラハ南西40kmの城の庭に放したものがわずか50年でヨーロッパ全土に生息域を拡大してしまったように繁殖力も高い(Elton 1958, Niethammer 1963)。

しかし、サハ共和国においては従来外来生物問題に対する意識が低く、1990年代半ばくらいまでは外来毛皮獣の導入についても経済効果ばかりに目が向けられてきた傾向があった。しかし、最近では外来生物の負の影響についての認識も深まりつつある。サハ共和国でも近年は外来生物問題に関する意識も浸透してきており、マスカラットについても増殖からコントロールへと意識の転換が見られはじめている。長年の毛皮価格の低迷と人工毛皮の出現によって市場の関心が薄れつつあるという背景もあるが、マスカラットは穴を掘って土手を破壊して洪水を助長することから、洪水被害に苦しむヤクーツク近辺の住民には厄介な存在として認識されるようになってきていることも事実である。当初は毛皮生産の救世主として導入されたマスカラットも、現在は有害獣として認識され、コントロールの対象となりつつある。

外来生物問題は今や世界的課題となっているが、シベリアにおいても生物多様性保全のための重要課題として意識されるように変化してきており、今後の毛皮獣狩猟の在り方はこうした生物多様性保全という視点に立った問題解決も図られる必要がある。

### 4.2 毛皮獣狩猟と社会変動

従来のサハ共和国では、自然保護という観点で研究者と議論する際に、各生物相内における種間関係は考慮されているが、群集や生態系といった生物相間の関係を広く捉えた観点到に乏しかった印象があった。しかし、ここ10年程度の間広い視野での生態系管理が重視されるようにパラダイムシフトが生じてきているようである。

毛皮の量産が社会的な重要課題であり、各々の毛皮獣の個体数増加を中心に考えるのであれば、生物群集や生態系といった全体的バランスを考えることはないがしろにされ、そのために従来は外来生物の問題には注意が払われなかったことが予想される。10年前にマスカラット導入の問題について現地の生物学者と議論した際には、同じ毛皮獣同士となる哺乳類間での種間競争や悪影響はみられないので導入に問題はないう意見が強く、植物や水棲生物への影響を投げかけても問題にはされなかったが、状況はこの10年で社会の変動に伴って大きく変化してきたようである。

## 5 おわりに

社会的に自然環境保全の意識が高まる中であってもシベリアという厳しい自然環境において毛皮の需要はつきることはないと考えられる。先進国の中では動物愛護の観点から毛皮不買運動なども相変わらず盛んではあるが、シベリアの人々において毛皮は生活必需品であり、自然資源としての毛皮獣の持続的利用はシベリアの人々の生活にとってバランスを欠いてはならない重要問題である。幾重もの社会変動による影響を受けてきたシベリアの毛皮獣狩猟であるが、社会変動に加えて今新たに気候変動という影響も危惧される状況にある。今後の調査では、さらに毛皮獣狩猟に与える温暖化の影響を毛皮獣の分布のみならず、人間社会側の技術や捕獲手法の改良などといった側面からも明らかにしていく予定である。

## 6 参考文献

- Elton, C.S. (1958) *The Ecology of Invasions by Animals and Plants*. London. (エルトン, C. S. (1971) 『侵略の生態学』 思索社)
- Ikeda, T (2003) Present Situation of Furbearer Hunting in Northern Yakutia : Turning Point of Traditional Hunting Activities., *Northern Asian Studies*, 6:77-88 (Indigenous Ecological Practices and Cultural Traditions in Yakutia, Center for Northeast Asian Studies, Tohoku University)
- Long, J.L. (2003) *Introduced Mammals of the World*. CSIRO Publishing, Collingwood, Australia.
- 松井健 (1998) マイナー・サブシステムの世界—民俗世界における労働・自然・身体—, 篠原徹 (編) 『民族の技術』 朝倉書店.
- Niethammer, G. (1963) *Die Einbürgerung von Säugetiere und Vögeln in Europa*. Humburg & Berlin.

# カムチャッカ沿岸部に居住する先住民の伝統的生業にかんする調査報告

永山 ゆかり

北海道大学大学院 文学研究科

## 1. はじめに

本研究の目的は東シベリアのカムチャッカ地方沿岸部に居住する先住民がどのように水産資源や植物資源を利用してきたか、またその利用は気候変動にどのような影響を受けるのかを明らかにすることである。

カムチャッカ地方北部の旧コリヤーク自治管区に居住するアリュートルは、伝統的に漁撈・怪獣狩猟・植物採集に従事してきた。本シベリアプロジェクト G3 の主要な調査地であるサハ共和国とは異なり、この地域は洪水がほとんど発生せず、また伝統的な生業の主幹である漁撈活動は環境変動による深刻な影響を受けにくいと予想される。

環境の変化が先住民の生活にどのような影響を及ぼしているかを調べるには、現在の状況と過去の状況を比較する必要があるが、現在であれ過去であれカムチャッカ先住民の生業にかんする詳しい資料はない。沿岸部に居住する先住民の先住民の主食が魚であることや、サケマス類の加工品を越冬用に備蓄することは、Antropova (1971: 25)やVdovin (1973: 70)などソ連の研究者によって指摘されてきたが、量についての具体的な数値はあげられていない。Stebnitskii (2000: 123)が1927年にアプカ村のコリヤークが冬用に用意した干し魚についての数値をあげているのが唯一の資料であるが、それも数値は干し魚にかぎられており、漁撈の全体量をあらわすものではない。植物資源の利用についてはさらに資料が少なく、100年以上前の調査にもとづいた、コリヤークの人々が利用する植物数種の学名について報告があるだけである (Jochelson 1908/1975)。

本研究ではアリュートルおよびコリヤークの人々が伝統的に利用してきた水産資源および植物資源の種類を同定し、そのうち備蓄されたものについては聞き取り調査や文献調査によって備蓄量を調査した。

## 2. 研究対象地域と方法

調査地はロシア連邦カムチャッカ地方北部の旧コリヤーク自治管区である。2010年にはチギリ地区パラナ村および、旧カムチャッカ州ペトロパブロフスク・カムチャツキー市で調査を行なった (図1参照)。

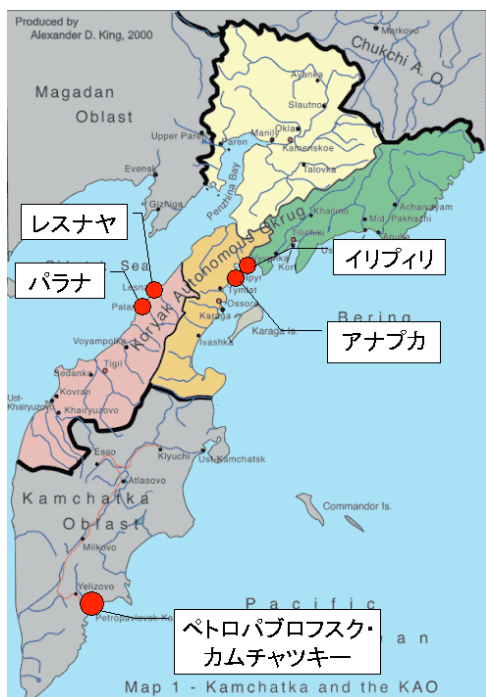


図1 調査地および情報提供者の出身地 (King 2002 をもとに作成)

コリヤークは伝統的にトナカイ飼養を生業としてきたトナカイ・コリヤークと、沿岸部に定住し漁撈や海獣狩猟を主な生業としてきた海岸コリヤークの2グループに分かれ、筆者はそのうち定住コリヤークおよびアリュートルの人々から聞き取り調査を行なった。パラナ村には海岸コリヤークの村であるレスナヤ村出身者が多く住むほか、ペンジンナ地区出身の海岸コリヤークも居住している。調査に協力していただいた人々は以下のとおりである。( )に生年、出生地、民族名を示す。

BVK : Belousova Varvara Kondrat'evna (1930年レスナヤ生まれ、海岸コリヤーク)

CLI : Chechulina Lidiia Innokent'evna (1957年アナプカ生まれ、アリュートル)

CEI : Chechulin Egor Innokent'evich (1960年アナプカ生まれ、アリュートル)

KhSM : Khelol Sergei Mironovich (1956年パラナ生まれ、海岸コリヤーク、両親はペンジンナ地区出身)

SIuP : Solodiakov Iutty Penelkutovich (1939年パラナ生まれ、トナカイ・コリヤーク)

植物の学名の同定にあたっては Smetanin and Bogoiavlenskiy (2000)を参照したほか、Kamchatka Institute of Ecology and Natural Resource UseのOlga Chernyagina氏の協力を得た。貝類の学名同定にあたっては Smetanin (2002) を参照したほか、千葉県立中央博物館の黒住耐二氏の協力を得た。

### 3. 結果

2010年2月の調査では、下記2点について聞き取り調査を行なった。

- 1940年代の生業活動の調査：漁撈のサイクル、「飢饉」における対応など
- 1960年代における生業活動の調査：越冬用に用意した食物の種類と量

### 3.1. 水産資源

水産資源のうち備蓄する対象となるのはサケマス類の魚 3 種(カラフトマス、シロザケ、ギンザケ)およびアザラシである。貝類は 5 月ごろの干潮が大きなころか、嵐のあとなどに岸に打ち上げられたものを採集した。ほとんどの場合すぐに消費され、備蓄することはまれであった。

参考までに以下にこれまでの調査で得られた水産資源の名称をあげる。アリュートル語の名称はすべて複数形である。いずれの名称も本プロジェクト以前の調査で得られたものであるが、本プロジェクトと深く関わるため特に名称を列記する。植物名についても同様である。

#### (1) 魚類

##### (1a) サケマス類

asuwwi 「カラフトマス」、qitawwi 「シロザケ」、təkanuwwi 「ギンザケ」、witiwwi および kimɣiju 「オショロコマ」、wiruwwi 「ベニザケ」、uqənsawwi 「アメマス」、awasu 「マスノスケ」、ənʔamu 「サクラマス」、kəsavu 「カワヒメマス」。

##### (1b) サケマス類以外の魚類

tulukawwi 「マダラ」、ilʔaqu 「カジカ」、ukitu 「ニシン」、ɣasɣaxərrju 「カワメンタイ」、ivitawwi 「ソイ」、waqnuwwi 「コマイ」、mikiwwi 「ワカサギ」、liŋaqu 「キュウリウオ」、tutkawwi 「カワカマス」。

#### (2) 貝類

jəʂatu 「イガイ類」 *Mytilus sp.*、ɣuɣunaŋu 「コケライシカゲガイ」 *Clinocardium ciliatum*、amtuwwi *Mya uzenensis*、vəlʔyilʔqəlʔɣu 「オオミゾガイ」 *Siliqua alta*、vərruwwi 「チシマガイ」 *Panomya nipponica*、pampəsqaawwi 「ケショウシラトリ」 *Macoma calcarea*、kəlʔkaku 「タマキビ類」 *littorina kurila* など。

#### (3) その他の海棲動物

ʂawinaŋu 「クリガニ」、inunkukawwi 「ウニ」、isəmʔawwi 「ナマコ」、wakalanu 「ホヤ」など。

水産資源の利用は現在では大きく減少しており、また漁撈を生業としない若い世代にとって、漁撈はたんなる余暇の過ごし方の一つになりつつあることが KhSM のインタビューによって確認された。

### 3.2. 植物資源

植物資源は漁場に滞在中、漁撈のかたわら採集された。このうち越冬用に備蓄するのはベリー類のうち 5 種(表 3 参照)、その他の植物およそ 6 種(表 4 参照)である。

#### (1) ベリー類

əvənʔu 「ガンコウラン」 *Empetrum nigrum*、rəttuwwi 「ホロムイイチゴ」 *Rubus Chamaemorus*、ɣəjənʔu 「コケモモ」 *Vaccinium vitis-idaea var. minus*、mimjuwwi 「ウラジロナナカマド」 *Sorbus sambucifolia*、liŋluwwi 「クロマメノキ」 *Vaccinium uliginosum*、əlitʔawwi 「ハスカップ」 *Lonicera caerulea*、wəlʔawwi 「アカフサスグリ」 *Ribes sp.*、perəttu 「チシマイチゴ」 *Rubus arcticus*、ilʔŋatɣəjənʔu 「ヒメツルコケモモ」 *Oxycoccus microcarpus*。

(2) 根

ənatiwwi 「カラフトゲンゲ」 *Hedysarum hedysaroides*, mətawwi 「ムカゴトラノオ」 *Bistorta vivipara*, rəmŋuwwi *Claytonia acutifolia*, awwikawwi 「クロユリ」 *Fritillaria camtschatcensis*, qutawwi *Polygonum tripterocarpum* A. Gray, pəqrəmŋu 「ハマベンケイソウ」 *Mertensia maritima* ssp. *asiatica*, təpawwi 「スギナ」 *Equisetum* sp. など。

(3) その他の植物資源

ŋunawwi 「ハイマツの実」 *Pinus pumila*, nununu 「ヤナギラン」 *Chamaenerion angustifolium*, wiwiwtu 「キタダケヤナギラン」 *Chamaenerion latifolium*, aŋaŋu 「オオハナウド」 *Heracleum lanatum*, tintinu 「エゾノシシウド」 *Angelica gmelinii*, ilʔaqsinvəlyaw 「マルバトウキ」 *Ligusticum scoticum* など。

3.3. 伝統的な漁撈サイクル

レスナヤ・コリヤークの伝統的な漁撈サイクルは表 1 に示した通りである。BVK によれば 1 年を通して常に魚が得られる状態にあり、魚が不足して飢えたという経験はない。なお表 1 に示した漁撈サイクルは大まかなものであり、さらに聞き取り調査を重ねる必要がある。

表 1 レスナヤ・コリヤークの伝統的な漁撈サイクル

時期	魚種
1 月-2 月	コマイ、スケソウダラ
3 月上旬	カジカ、カレイ
3 月下旬-4 月上旬	オショロコマ
5 月-6 月	アメマス (11 月まで)
6 月-11 月上旬	カラフトシシャモ (10 月まで)、カラフトマス、オショロコマ、アメマス、シロザケ、ギンザケ、ベニザケ、マスノスケ、ニシン、キュウリウオ、ワカサギ

3.4. 1960 年代の水産資源および植物資源の保存

1960 年代におけるアリュートルの一家庭をモデルケースとしてとりあげる。情報提供者は CLI で、家族構成は大人 4 名(父、母、祖母、伯母)、子供 6 名および犬 13 匹(橿犬 10 匹 + 雌犬 1 匹 + 仔犬 2 匹)である。CLI の父親であるインノケンティ・チェチューリン(1929 年アナプカ生まれ)は 3 ヶ所の漁場で漁撈を行っていた(図 2)。CLI およびインノケンティ・チェチューリンの生地であるアナプカ村は 196\*年に閉鎖され、住民の大部分はイリプイリ村に移住させられた。しかし住民は移住後も引き続きそれまで利用していた漁場で漁撈を行なっている。



図2 インノケンティ・チェチューリン氏の漁場 (1960年代)

- サケマス漁の期間中は犬は自分で魚の残骸を食べるので餌は与えない。
- 11月から4月にかけては1日に1度餌を与える。(犬用干し鮭1匹+アザラシ脂身、あるいは犬用干し鮭を煮たもの)

表2 サケマス類の保存

漁場	骨つき 干し鮭 (匹)	干し鮭 (匹)	鮭の骨 (匹)	発酵鮭	期間
1: チュチュウイナ岬	5000	600	600	300kg*3 穴	
2: ワルワヤム川河口	2000	600	600	500kg*3 穴	8月上旬から1ヶ月
3: ワルワヤム川上流 (河口より2-3km地点)	1500	300	300	300kg*1 穴	9月上旬10日から15日
合計	8500	1500	1500	2700kg	

表3 ベリー類の保存

ガンコウラン	30L
ホロムイイチゴ	100L
コケモモ	20L
タカネナナカマド	20L
クロマメノキ	10L

※ ハスカップ、フサスグリなど少量しかとれないベリーは保存せず、すぐに消費した

表 3 その他の植物の保存

ネズミの巣穴にある植物の根	4.5kg (1.5kg * 3)
カラフトゲンゲの根	1kg
ムカゴトラノオの根	2kg
Claytonia の根	1kg
クロユリの根	25L
ヤナギランの髓	40kg (生)
ハイマツの実	50kg 入米袋 * 3

※ ネズミの巣穴にはさまざまな植物の根が雑多に蓄えられており、1つの巣穴からはおよそ 1.5kg の根が得られた。

また上記のほかに、アザラシを 1 冬用に 3 頭およびアザラシの胃袋に脂身を詰めたもの 2 つ備蓄した。

#### 4. 考察

アリュートルおよびコリヤークの人々が消費する漁業資源の量はかなり多いことはこれまでも指摘されてきたが、本調査により具体的な数値を明らかにすることができた。アリュートルおよびコリヤークの漁撈は一年を通して行なわれており、一つの魚種への依存が少ない。環境変動によりある魚種が少ない場合でも、漁場を変更するか、あるいはほかの魚種による代替が可能で、総量として漁業資源の備蓄量は一定している。

本稿で示した 1960 年代の数値に比べると、21 世紀現在の先住民が消費する魚類の量はずっと少なく、生活に占める漁撈の割合も大きく減少している。さらに漁撈は、生業として従事するというよりは、余暇のひとつになりつつある。植物資源のうち現在でも多くの人々により積極的に採集されているのはベリー類およびハイマツの実のみであり、ヤナギランの髓や根はほとんど採集していないか、ごく少量採集されるにすぎない。現在これらの資源をどれくらい利用しているかは、さらなる調査で明らかにしていく必要がある。また今回の調査では調査しなかった狩猟(海獣、野鳥、陸獣)については来年度以降調査していく予定である。

漁撈についてはさらに多くの人々から聞き取り調査を行ない、資料の蓄積をはかるとともに、日本側とロシア側のサケマス漁獲高にかんする統計資料を利用し、聞き取り調査による資料と対照する。また環境変動による過去にあった環境変動に対する対応の事例を言い伝え、伝説などから調査する。

#### 5. おわりに

カムチャッカ沿岸部に居住する先住民の生業である漁撈は比較的安定しており、環境変動によって深刻な影響を受けることはないといっている。これまでの議論により、漁業資源利用について調査を進めるとい方向が定まったので、今後は過去の資源利用について引き続き聞き取り調査を続けるとともに、現在の資源利用についても詳細な調査を進める。またロシア側の文献と日本側の文献をもとに、サケマス資源量の推移についても検討し、資源利用についての資料と対照する。



## 6. 参考文献

- Antropova, V.V. 1971. Kul'tura i byt koriakov. Leningrad: Nauka.
- Jochelson W. 1908/1975. The Koryak: The Jesup North Pacific Expedition, vol.6. AMS Press: New York (reprint from the edition of 1908, Leiden and New York). 842 p.
- King, Alexander D. (2002) Social Geography of Koryakia. Koryak Net <<http://www.koryaks.net/geo.html>> (accessed on 2010-11-30).
- Smetanin, A.N. 2002. Presnovodnye i morskije zhivotnye Kamchatki (ryby, kraby, molliuski, iglokozhiye, morskije mlekoopitaiushchie). Sankt-Peterburg: Politekhnik.
- Smetanin, A.N. and V.F Bogoiavlenskiy. 2000. Primechatel'nye rasteniia iz prirodnoi flory Kamchatki. Petropavlovsk-Kamchatskiy: Novaia Kniga.
- Stebnitskiy, S.N. 2000. Ocherki etnicheskoi istorii koriakov. Sankt-Peterburg: Nauka.
- Vdovin I.S. 1973. Ocherki etnicheskoi istorii koriakov. Leningrad: Nauka.

## 人類のシベリア進出史およびトナカイの消長について

佐々木 史郎  
国立民族学博物館

調査に関しては、アムール川の支流のゴリン川とツングースカ川において近現代の先住民族(ナーナイ)の旧集落跡の立地条件を調査した。その結果、基本的に彼らは常に川が岸辺を洗うような場所に集落を作っていたが、そこは基本的に乾燥していて、乾燥地を好むモンゴリナラの群落がある場所に限られていた。また、逆にそのような場所には時代は発掘をしないとわからないが必ず堅穴住居のあとなど人の居住を伺わせる遺構が見つかる。

人類の本格的なシベリア進出は、ホモ・サピエンス(現生人類)の登場を待たなくてはならない。その理由と進出の方法は、シベリアに進出しようとして完全には達成できなかったネアンデルタールとの比較から明らかにすることができるかもしれない。洗練されてはいたが、それ以上の発展がのぞめなかったムスチエ文化にあくまでも固執し、それが保障する生活で満足していたネアンデルタールと、発展、開発への飽くなき欲求を満たすかのように次々と新しい技術、文化を編み出していったホモ・サピエンスの違いが、遺伝子に基づく生物学的な差異以上の差異を両者にもたらしたといえるだろう。

なお、Sasaki(印刷中)では、西シベリアのツンドラ地帯での大規模なトナカイ飼育の成立過程を論じたが、その中で、野生トナカイの勢力の消長と大規模トナカイ飼育とのせめぎ合いが、野生トナカイ狩猟とトナカイ飼育の生産活動における比重の軽重を左右するという事を指摘した。ことに北部ヤクーチアにおける野生トナカイ狩猟と大規模トナカイ飼育とが併存する状況を説明するのには、社会主義政権が奨励した大規模トナカイ飼育が野生トナカイに対する開発圧力として作用し、その勢力を押さえ、ところによっては絶滅の危機にまで追い込んだが、ソ連崩壊と市場経済の導入とともに、政府による補助、援助がなくなるとともに、支えを失ったかのように大規模トナカイ飼育は次々と崩壊し、ツンドラ地帯から撤退したために、今度は野生トナカイの勢力拡張、頭数増大という現象が見られた。しかし、そのことが今度は北極圏における資源開発圧力とせめぎ合うことになる。政策や市場が絡む人間の開発圧力と自然界からの野生の圧力の平衡関係の揺れが、野生トナカイの勢力の消長として表れると想定できるだろう。

2011年度以降は、アムール水系における村落立地条件の調査は、生活条件に関するより詳細な調査へと深化する予定である。実際には食生活を支える食材の入所経路を観察し、それにかかる費用や労働力を算出して自然環境と人為的な環境が彼らの生活にどのように関わるのかを探る。

また、その一方でシ北部ヤクーチアでの野生トナカイ狩猟に関するデータから、北極圏における政治経済的な開発圧力と自然界からの野生の圧力とのせめぎ合いの様子をモデル化してみる予定である。

### 文献

Sasaki, S. (in press): Establishment of the large scale reindeer herding in the European and West Siberian Tundra. In Stammler, F. and H. Takakura (eds.) *Good to Eat, Good to Live with: Nomads and Animals in Northern Eurasia and Africa*. (Northeast Asian Studies Series 11), pp. 77-99. Sendai: Tohoku University, Center for North East Asian Studies

## G3c（環境認識・政策研究チーム）活動要約

藤原 潤子

人間文化研究機構 総合地球環境学研究所

G3c 班の課題は、環境変動の地域住民の生活への影響とそれに対する現地の認識・対応を明らかにすること、及びその分析においてキーワードとなる適応性・脆弱性概念を精査することである。

課題を遂行するにあたっては、近年頻繁化・大規模化している水害、及びそれに伴って浮上している移住問題が切り口として有効であるという認識に至っている。温暖化によって生じている水害が地域住民の生業（漁労、牧畜、狩猟、農耕、採集など）その他の生活にどのような影響を及ぼしているのか、行政はどのような政策を行っているのか、また災害を認識し対応するにあたって、科学知識と民俗知識がどのように使い分けられているのか、というような観点から調査を行っている。

調査方法は、主に文化人類学及び社会学の手法を用いている。具体的には参与観察、インタビュー、アンケート調査、各種アクターが発する情報・記録の収集・分析（政令、嘆願書など）、マスメディア情報の分析、及び適応性・脆弱性に関する研究レビューである。

フィールド調査地としては、ヤクーツク近郊、および大規模な水害が起こっているレナ川、アラゼヤ川、ヤナ川、コルィマ川流域の村を選定した。またサハ共和国政府、サハ共和国非常事態省他、洪水対策に関わる各種行政機関でインタビューを行った。またシベリア・プロジェクトを適応性・脆弱性に関する国際的な研究として位置づけるための準備として、両概念の整理も行った。その結果、気候変動の生業への影響、政策側の論理、移住のプロセス、適応・脆弱概念の多様性などが明らかになりつつある。

今後は一般化のレベルを高めるために、より多くの災害地域で調査を行うと同時に、マスメディア情報などの収集を継続する予定である。また歴代政府要人へのインタビューの実施により、政策決定過程にも踏み込みたい。他のグループとの連携としては、水量や川の融解期に関するモニタリング資料、及び洪水に関する衛星画像の利用が考えられる。また、適応性・脆弱性概念の定義について、これまでの成果を元にプロジェクト内で議論を提起し、理解を共有していくことも必要であろう。

# サハ共和国における環境変動と移住問題

藤原 潤子

人間文化研究機構 総合地球環境学研究所

## 1 はじめに

本報告は東シベリアのサハ共和国において、地球温暖化による環境変動がどう認識され、どのような対応が行われているのかについて、その一端を明らかにするものである。

ロシア連邦サハ共和国は、地球上で人間が住む地域としては最も寒い場所のひとつであるが、そこでもさまざまな形で温暖化の影響が出ている。中でも共和国レベルで大きな問題となっているのが、温暖化の影響によると見られる洪水（春の雪解け洪水、永久凍土融解による洪水、多雨による洪水など）である。サハではある程度の洪水は生業に不可欠なものとして生活の中に組み込まれてきたが<sup>1</sup>、近年その規模が拡大かつ頻繁化したことにより、災害として問題化されることとなった。一部の地域では共和国政府主導の下で、移住が検討されている。

シベリアプロジェクトにおいては、気候変動による地域住民の生活への影響が重要テーマとなっているが、災害の結果としての移住はその最たるものである。本稿ではまず、サハにおける近年の洪水被害を概観する。その上で、移住のプロセスについて、行政側／住民側の思惑に焦点を当てて論じたい。

## 2 調査対象地域と方法

2010年春、2010年夏にサハ共和国の村落部及び都市に滞在し、文化人類学的方法による参与観察、インタビュー、及び文献収集を行った。

村落部における主な調査地は、近年の気候変動によって大規模な水害被害の出ている、スレドネコルィムスク郡アルガフタフ村である。村は人口約600人、民族構成は基本的にサハ人、生業は漁労、牛馬飼育、狩猟、採集、毛皮獣飼育、野菜の栽培などである。北極海にそそぐアラゼヤ川流域に位置するこの村は1998～2008年に、永久凍土融解によって夏の間徐々に水位が上がっていくという、長期間にわたる洪水を経験した（Alazeia 2009）。約10年に渡る洪水により、生業、特に牛馬飼育に甚大な悪影響が出ており、移住案も浮上した。

アラゼヤ川流域に関しては上記に加えて、スヴァタイ村（主にサハ人が居住する村）、アンドリューシキノ村（ユカギール人他が居住する村）出身者へのインタビューも行った。また、春の雪解け洪水が頻発することにより移住が決定している、スレドネコルィムスク郡ベリョーゾフカ村（主にエヴェン人が居住する村）出身者へのインタビューも行った。

村落部での調査と平行して、共和国首都ヤクーツクや郡の中心の町などで、行政関係者へのインタビューも行った。これまでにインタビューを行った行政機関は以下の通りである：サハ共和国政府、サハ共和国洪水被害撲滅・復興執行部、サハ共和国非常事態省、スレドネコルィムスク郡、共和国政府依頼の研究プロジェクト「アラゼヤ 2008」。さらに新聞やインターネットなどのマスメディアを用いて、共和国政府が発布する政令及びプレス・リリースも収集した。

---

<sup>1</sup> 本報告書の高倉浩樹報告「氷結水環境における民俗と在来知」を参照のこと。

### 3 結果と考察

#### 3.1 洪水リスクについての共和国及びロシア連邦の認識

サハ共和国は非常に水資源が豊かな地域である。共和国内には長さ 10 キロ以上の川が 70 万以上もあり、それゆえに洪水被害に見舞われやすい。共和国政府によると、ほとんどすべての居住区(村及び町)が洪水リスクをかかえる。2010 年現在、洪水のリスクが特に大きい居住区は 92 あり、その人口は 136,400 人である(Postanovlenie 2010)。サハの総人口は 951,400 人であり<sup>2</sup>、サハの人口の約 14%が高リスクにさらされている計算になる。

気候変動によるサハの洪水リスクについては、ロシア連邦レベルの報告書でも語られている。ロシア水文気象観測所(Rosgidromet)による「ロシア連邦における 2010-2015 年の気候変動及びそのロシア経済に与える影響についての戦略的予報」(2005 年)によると、サハのレナ川流域では温暖化による永久凍土の融解なども手伝って、流氷などの集積による洪水は 2015 年までに 2 倍に増える。またサハの河川の氷の最大厚が 20-40%減少し、凍結期間及び凍結・融解プロセスが大きく変化すると予測されている(Postanovlenie 2010)。

#### 3.2 サハ共和国における洪水被害の実態

2010 年にサハ共和国政府から出された洪水に関する報告書では、近年の特に被害が大きかった年とその被害額が次のように記されている。1 ルーブル=3~4 円程度とすると、毎年のように数十億~数百億円の被害が出ていることになる。

表 1 洪水による被害額 (Postanovlenie 2010)

年	単位:ルーブル
1998	939,400,000
2001	7,000,000,000
2002	114,600,000
2004	439,000,000
2005	97,400,000
2006	7,700,000
2007	1,088,500,000
2008	939,100,000

被害の中身の一例を挙げると、近年最初の大洪水である 1998 年には 205 の居住区で被害、5 人死亡、何らかの被害を受けた人は 47,000 人、15,000 以上の家屋が浸水(うち全壊 746 軒)となっている。また近年で二度目の大洪水となった 2001 年は、サハの 35 の郡のうち 10 郡で被害(首都ヤクーツクとその周辺を含む)、うちレンスクの町他、一部の居住区は完全に浸水、死者あり、3489 の家屋、704 の農業関係施設、数十の橋、4,000 以上の温熱・水・電気・石油・ガス供給ラインが破壊され、2184 頭の家畜が死亡、30 トン近くの植え付け用作物が水没、という被害状況である(Postanovlenie 2010)。

<sup>2</sup> 2009 年 1 月 1 日現在。

マスメディア情報及び政府関係機関でのインタビューを総合すると、共和国レベルで対策を講じる問題として洪水が認識され始めたのは1990年代末である。1998年に大きな被害が出たこと、以降、洪水が頻繁化したことにより、対策の必要性が訴えられるようになった。1998年以前に関しては、20世紀は全般に水量は少なく、洪水はあるにしても10年か数十年に一度程度にすぎなかった。

洪水を災害として問題化するかどうかは、居住形態ともかかわっていると思われる。ソビエト政権によって定住化が進められる以前、すなわち20世紀前半までは、サハの人々は現在よりも遊動性の高い生活をしてきた。そのため、災害によって移住をせまられる事態になっても、定住生活者ほどには大きな出来事としてとらえなかったのではないかと考えられる。

### 3.3 洪水対策に関わる諸機関

洪水への対処と政策には様々な機関が関わっている。そのトップはサハ共和国政府で、洪水に関わる案件の議決、及び政令発布を行っている。共和国政府の直轄で実質的な業務を行っているのが、サハ共和国洪水被害撲滅・復興執行部である。この機関は近年2回目の大洪水の年にあたる2001年に創設され、被害状況調査、復興資金支出、予防のための施策を行っている。その他の関係機関としては、サハ共和国非常事態省とサハ共和国自然保護省が洪水時の救出業務を行っている。また膨大な家屋及び公共インフラが破壊されるため、サハ共和国住宅サービス・エネルギー省、サハ共和国建設・建設資材産業省も洪水対策に関わっている。また洪水によって膨大な経済的損失が生じるため、サハ共和国財務省、サハ共和国経済発展省も政策決定に関わっている。以上が共和国レベルの機関である。それより下の行政機関としては郡役場、村役場があるが、これらは予算規模が小さいため、役割としては被害状況をまとめて共和国政府に嘆願書を出す、災害に備えた自警団を組織するというようなレベルに留まる。

洪水対策においては、水量や気象のモニタリングを行う機関も重要な役割を負っている。共和国レベルのモニタリングは、連邦水資源局レナ川水域管理部が行っている。またロシア各地のモニタリング情報をもとに、ロシア連邦水文気象観測所が環境変動の予測やそれに伴う経済被害の予測などを行っている。洪水対策においてはさらに、政府の依頼による調査研究プロジェクトも組織されており、研究者から政策立案者への提言が行われている。

### 3.4 移住方法

洪水が頻繁に起こり、適応が困難と判断されると移住問題が浮上する。サハ共和国洪水被害撲滅・復興執行部は被害額をできるだけ減らしていくという方向で施策を行っており、毎年のように被害を受ける地域に対して移住を提案する。

これまでに出ている移住案を見ると、移住は基本的に村ごと移設という形をとっている。アルガフタフ村で移住問題が浮上した際に村人に対して行われたアンケート調査を参照したが、移らざるを得ない場合は、多くの人が個別の移動ではなく村ごと移設することを希望していた。このような形での移住が望まれる背景としては、サハの村の多くが血縁あるいは姻戚関係にある人々から成っていることを指摘することができる。村には一定の相互扶助関係ができており、人々はそれを解体してしまうことに不安を感じるのであろう。ただし親族がいるなどの理由により個別に町へ移住を希望する者もあり、共和国政府は町で住居を建設し提供するなどの援助も行っている。

これまでの聞き取り調査の印象では、村の移設は政府側が住民に提案し、動きたがらない住民を説得するというプロセスをたどることが多いようである。政府側が住民を移住させたがるのは、毎年の被害補償が財政的に負担だからである。村の移設には一時的には莫大な資金が必要だが、根本的な解決策となるため推奨される。ただし政府は住民に移住を強制することはできない。移住には住民集会の賛成が不可欠である。

2010年夏現在、移設が決定している村は以下の10である。これらは1998年と2001年に大きな洪水被害があったことを受けて、2002年1月15日に移設が決定した<sup>3</sup>。2010年現在、すでに移設がほとんど完了している村もある。また以下の10の村以外にも、移設案が出ている村、または出たことのある村はいくつもある。

表2 移設が決定している村

居住地名	流域	郡
キティル・デュラ Kytıl-Diura	レナ川	ハンガル郡
ハプチャガイ Khapchagai	レナ川	メギノ・カンガル郡
キツラフ Kyllakh	レナ川	オリヨクマ郡
フタロイ・ホムスタフ 2-i Khomustakh(中心はKatas)	レナ川	ナム郡
カルヴィツァ Kal'vitsa	ベルゲ・チュギユエネ川(レナ川支流)	コビヤイ郡
アルビンツィ Arbyntsy(中心は Sygynakh)	レナ川とアルダン川合流地点	ナム郡
クタナ Kutana	アルダン川	アルダン郡
ハティスティル Khatystyr	アルダン川	アルダン郡
チェリクチャイ Cherikhtai	アルダン川	ウスチ・アルダン郡
ベリョーゾフカ Berezovka	ベリョーゾフカ川(コルィマ川支流)	スレドネコルィムスク郡

### 3.5 移住先の選定：アルガフタフ村の例から

村ごと移設する際の建設地の選定方法について、永久凍土の専門家などの協力を得て選定が行われたアルガフタフ村の例をみていきたい。

まず重要なのは標高で、言うまでもなく水没しにくい場所でなければならない。地盤については、地下氷がないことが重要である。シベリアの地下には場所によって巨大な地下氷があるが、これが溶けると地盤が崩落するため、地下氷は避けなければならない。地盤に関してはさらに、穴を掘ることが可能であるという点も重要で、これは貯蔵庫を地下に掘るためである。国土のほとんどが到達困難地域に指定されているサハ共和国において、外からの食料輸送には制限が多いため、大量に食料が保存できる地下貯蔵庫は不可欠である。たとえば岩場は地盤が崩落しないという点では優れているが、地下貯蔵庫が掘れないので不可ということになる。さらに漁労を生業とするサハの村落部の住民にとっては、川からの距離が近いことも重要である。しかし川から近いということは洪水の被害を受けやすいということでもある。

洪水被害を受けにくい川から近く、しっかりした地盤でありつつ穴を掘ることが可能な場所を見つけることは、一般にかなり困難なことである。アルガフタフ村の場合、候補地は挙げたが、上記の条件を完全に満たすものではなかった。条件に合う場所がなかったこと、2009年以降水位が低下していることにより、アルガフタフ村の移住案は決定には至っていない。

<sup>3</sup> サハ共和国議会オフィシャルサイト: <http://il-tumen.sakha.ru/?id=9986&y=2006&m=6> (2010年11月参照)

### 3.6 旧くて新しい居住形態

移設が決定している村のうち、一部の村ではかなり建設が進んでいるが、興味深いことに、新村が完成しても旧村が必ずしも放棄されるわけではなさそうである。住民側と共和国政府側の妥協点として、冬から春の雪解けまでは新村、夏は旧村に住むという居住形態案が浮上している。ここで双方の思惑を紹介したい。

住民にとって洪水は大問題だが、春の雪解け洪水が問題となっている村では(大多数の村の被害はこのタイプに入る)、旧村は春以外には何の問題もない。むしろ川に近い、漁労には絶好の立地である。そのため住民は、洪水被害を避けて水辺からやや離れた場所に建設されがちな新村でなく、できるかぎり水辺に近い旧村に住みたいと考えるのである。水辺への近さは特に、ボートが漁労のための移動手段となる夏に重要である(冬はスノーモービルで移動する)。

他方、共和国政府にとって重要なのは、洪水が起こるたびに支出をせまられる復興費用・見舞金・補償金を減らしていくことである。家屋に関して補償対象となるのは、主たる居住家屋のみであるため、新村に人々を移してそこを主たる居住家屋として登録してしまえば、夏の家となった旧村に洪水被害が出ようとも、補償の対象とならない。住民集会を経て、新村完成を間近にしてなお移住を渋る住民に対し、政府側は「夏は旧村に住みなければ住めばいいから、とにかく新村に移ってくれ」と説得している。

季節によるこのような居住地の変更は、実はサハの先住民たちにとっては伝統的な居住形態である。ソ連時代初期に定住化政策が行われる以前、サハ人は夏の家と冬の家を持ち、季節に応じて漁労や牧畜を行っていた(IaIKA 2007: 476)。またその他の先住民族も、現在よりはるかに遊動性の高い生活をしていた。温暖化による洪水問題と移住政策は、定住化政策を逆戻りさせる方向へとつながりつつあると言えよう。

## 4 おわりに

本稿ではサハ共和国をフィールドとして、温暖化による洪水リスク認識、被害の実態、洪水対策のアウトラインを提示した。また環境変動の結果浮上した移住問題と、それをめぐる政府側と住民側の思惑のせめぎあいの一端を明らかにした。この調査は着手したばかりであり、今後のさらなる調査と分析が必要である。行政関係文書の収集を引き続き行い、移住を完了した村での調査にも着手することにより、環境変動の地域住民への影響と政策側の論理を精査していきたい。衛星画像による洪水被害状況の把握などに関して、他のグループの協力も仰ぎたいと考えている。

## 5 参考文献

Alazeia 2009

Alazeia – 2008: Razrabotka nauchno-obosnovannykh rekomendatsii po zashchite naselennykh punktov v basseine r. Alazei ot negativnogo vozdeistviia vod (Goskontrakt No. 017-2009). Yakutsk.

IaIKA 2007

Iakutiia: Istoriko-kul'turnyi atlas. Moscow: Feriia.

Postanovlenie 2010

Pravitel'stvo Respublika Sakha (Iakutsiia). Postanovlenie ot 27 maia 2010 goda No.253. Ob utverzhdenii Kontseptsii naselennykh punktov i ob'ektov ekonomiki Respubliki Sakha (Iakutsiia) ot navodnenii i drugikh vidov negativnogo vozdeistviia vod. <http://www.sakha.gov.ru/docs/253.pdf> (2010年06月参照)。



# 適応・脆弱性研究のレビュー

石井 敦

東北大学 東北アジア研究センター

## 1 はじめに

気候変動問題が国際社会における主要課題として認識されはじめた当初は、気候変動研究といえば緩和研究に集中していた。当時、適応がいずれは必要となるという認識はあったものの、適応を強調しすぎると緩和がおろそかになり無責任である、という忌避主義的 (preventionism) な考え方が支配的であったが、一方で、緩和に反対の立場からは、気候変動は適応で対処すればよいとする適応主義 (adaptationism) が主張され、両極端な考え方が同居していた。その後、気候変動の国際交渉において、途上国にも応分の緩和負担を求める主張が強くなってくると、気候変動の悪影響に対して脆弱な途上国へのサイドペイメントとして適応に注目が集まり、気候変動の科学アセスメントの知見が蓄積されてきたこととも相まって、現在は、緩和か適応か、ではなく、緩和も適応も両方必要不可欠な気候変動対策であるという現実主義的 (realism) な認識が支配的となっている。そのため、今まで研究が手薄であった適応研究は急速に増えているのが現状である。

この研究急増の現状から容易に想像されるように、適応・脆弱性の概念は多種多様なものが提案されてきている。例えば、一般的な適応の定義としては以下が挙げられる：

- the process through which people reduce the adverse effects of climate on their health and well-being, and take advantage of the opportunities that their climatic environment provides (Burton (1992))
- Adaptation to climate change includes all adjustments in behaviour or economic structure that reduce the vulnerability of society to changes in the climate system (Smith et al. (1996))
- adjustments to enhance the viability of social and economic activities and reduce their vulnerability climate, including its current variability and extreme events as well as longer term climate change (Smit (1993))

シベリアプロジェクトを国際的な研究として位置付けるためには、それらの概念をレビューした上で、どの概念を用いるのかを明らかにしなければならない。本節はその予備的レビューを概述するものである。

## 2 研究対象地域と方法

手法は、文献レビューである。研究対象地域は特に設けないが、シベリアを含む北極圏に関する文献を重点的に記述する。

## 3 レビュー結果

本節では、適応・脆弱性研究を、その内容と研究手法の二つの次元でレビューを行っていく。

### 3.1 適応・脆弱性研究：内容に関する分類

適応・脆弱性研究の内容は大きく二つに分類することができる。一つは、誰がどのようになぜ気候変動に対して脆弱なのか、また、適応策の限界はどこで、有効な適応戦略はどのようなものなのか、を問うもので、これが

現在の適応・脆弱性研究の圧倒的多数派である。この主流派は diagnostic アプローチと名付けることができる。もう一つは、規範的アプローチと名付けられる一連の研究群である。具体的には、社会的正義 (social justice) を強調するアプローチで、もっと広く見れば、気候変動の社会的次元 (social dimensions of climate change) を強調するアプローチの流れをくむものである。社会的正義を構成する中心的な規範の一つは公平性であるが、これは気候変動枠組条約の核となる原則の一つとして挙げられている。そして、気候変動は既存の不公平な状況をさらに悪化させる可能性が非常に高いため、適応・脆弱性を考えるうえで社会的正義は欠かすことのできないアプローチであるといえる。

### 3.2 diagnostic アプローチ

このアプローチはさらに、2つのアプローチ、すなわち、starting-point と end-point アプローチに分けることができる (O'Brien et al. 2004 ; Smit et al. 1999 ; Burton et al. 2002 ; Fussler and Klein 2006)。後者は IPCC が採っているアプローチであり、主流派を形成している。同アプローチでは、適応・脆弱性は気候変動がもたらす影響をすべて分析し終わった後の状態に関する性質のことであるため、end-point アプローチと呼ばれており、理系の研究が中心である。このアプローチでは、適応能力が脆弱性を決める、つまり、【気候変動影響－緩和－適応＝脆弱性】という因果関係をとる。このアプローチの目的は、温室効果ガス排出シナリオにおける脆弱性や、仮説的な適応戦略の評価であり、主要な研究課題は次のとおりである。

- 脆弱性を最小化するための温室効果ガスの最適削減戦略はどういうものか？
- どの地域がもっとも脆弱か？
- 適応しないことの経済的コストはどの程度か？(Ford et al., 2010)

一方、前者は IPCC の end-point アプローチに対する批判から提案されているアプローチであり、脆弱性を後付けで考慮するのではなく、starting-point として考えるものである。脆弱性についても理系的な側面ではなく、「社会的脆弱性」(Kelly & Adger 2000) を強調している。具体的に、社会的脆弱性とは、生活や安寧に対する外的ストレス (気候変動の悪影響等) へ対処、適応、また、回復、という意味において、個人・社会集団が持つ反応能力によって決まる、とする。このアプローチの主な研究テーマは次のとおりである。

- 誰、そして何が脆弱なのか、そしてなぜ脆弱なのか？
- 人間が置かれている状況や社会的プロセスが脆弱性にどのような影響をもたらすのか？
- 脆弱性はどのように差異化していくのか？
- 脆弱性の決定要因はどのようなスケールで発動するのか？
- 脆弱性を減少させるためには何をすればよいのか？(Ford et al., 2010)

ここでは、starting-point アプローチについて詳しくみていくことにする。

starting-point アプローチの代表的な研究は、Adger (1999)、Adger and Kelly (1999)である。Adger (1999)は「社会的脆弱性」の概念を構築し、その有用性を示すためのケーススタディを行っている。具体的なケーススタディはベトナムにおけるサイクロンに対する脆弱性を評価したものであり、その評価のための指標として、貧困、不平等、制度的適応の三つを用いている。貧困は物質的貧困指標で計測 (一人当たり GDP など) しており、貧困が脆弱性を引き起こす因果経路として、対応戦略の選択肢が限られること、エンタイトルメントの多様性が小さく限定されたものになってしまうこと、そしてエンパワーメントの欠如の三つを挙げている。不平等は資産やエンタイトルメントの定量的評価で計測しており、不平等が脆弱性を引き起こす因果経路として、直接的には少数派への入手可能なエンタイトルメントの集中が集団的エンタイトルメントに悪影響を及ぼすこと、間接的には、不平等が貧困につながり、それがエンタイトルメントの集中につながることを挙げている。また、制度的適応は制度の意思決定、社会的学習、慣性で定性的に計測する。具体的な事例としては、例えば、マングローブの私有化が進んだ結果として、1900ha のマングローブが失われ、その土地への移住が進んだ。これによりサイクロンに

対する社会的脆弱性が増大した。さらに、同研究ではマングローブを増やすことの費用便益分析が行われ、その結果、木材収入が増え、海岸線の防衛サービスも提供されることにより、マングローブを増殖させる適応戦略が win-win の政策として同定された。

### 3.3 規範的アプローチ

このアプローチの代表的な研究は、Adger et al. (2006)である。公平性はさらに二つに分類できることは共通理解が得られている。すなわち、分配的正義と手続き的正義である。前者の研究は、分配的正義に関して、気候変動の影響は不公正であり、新しい脆弱性を生み出す可能性があることを指摘している。さらに、気候変動の影響だけでなく、適応政策自体も勝ち組と負け組を生み出すことにより、分配的正義について含意を持ち、それを研究しなければならないとする。同研究が指摘する重要な関連研究課題は以下の4つのまとめることができる。

1. 先進国が持つ気候変動影響に対する責任は何か？
2. 先進国は途上国に対してどれくらい援助をしなければならないのか、また、その援助負担は先進国間でどのように分担すべきなのか？
3. どの国に援助し、どのような適応策に援助すべきなのか？
4. 適応策に関する意思決定をどのように行うべきなのか？

そして、最終的な結論として、下記の4つが公正な適応のために必要不可欠だと提案している。

1. 危険な気候変動を避けること
2. 未来志向の責任
3. 最脆弱な主体を第一に考慮する
4. すべてのアクターが参加する公正な参加

### 3.4 在来知

サブテーマ3は在来知を一つの主要テーマとして挙げている。本節では適応・脆弱性概念に関連する在来知研究のレビューを行う。

在来知をもつ先住民はこれまで、気候変動に関する研究の対象となることはあまりなかった。在来知は、普遍性を規範とする西洋科学に対するアンチテーゼとして構築されてきた概念である。21世紀に入ってから、適応や脆弱性における地域性を考えるにあたって、在来知が脚光を浴びるようになり、今では在来知は適応や脆弱性において不可欠な要素の一つであるという認識が広まりつつある（例えば、Ford and Smit 2004）。在来知は、地域の文脈にあった知識だけでなく、過去・現在の気候変化(King, Skipper, & Tawhai, 2008)や適応に関する知見をも提供できる。適応の効果性を高めるためには、在来知を用いた方が効果的だとする研究もある(Patt & Schroter, 2008)。

最新の在来知に着目した文理融合型の研究はMarin (2010)が挙げられる。2006年7月～2007年4月に遊牧民家庭、sum governors、land officersを対象に、インタビューを行い、言説分析、標本数51の質問票調査をした結果、言説分析により、早魃が砂嵐を引き起こし、それが植生に覆われた面積を減少させ、さらに早魃を引き起こすという、正のフィードバックを持つことが分かった。これは科学的予測と合致している。降雨量が増えていることは科学的データによる裏づけが得られなかったが、これは言説が間違っているということでは必ずしもなく、タイムスケールの違いに注意しなければならない可能性もある。この調査方法により、地域の住民にとって何が重要で、彼らが何を危険な変化とみなすのかが分かるだけでなく、何に脆弱なのか、という答えを提供することができる。

また、伝統知の気候変動研究への貢献の可能性を追求することを目的としたカナダのSachs Harbourにおける研究(Ford 1999 ; Berkes & Jolly, 2001)は、同地域の気候変動による影響のビデオ撮影やInuvialuitの気候変動関連知識の記録と、住民が直接研究に参加する参加型手法（ZOPPアプローチなど）を用いた結果、現地の住民が気

候の変化をどのようにみているのかを収集し、そして、過去の適応戦略を評価することに成功している。

#### 4 考察

レビューの結果、適応・脆弱性研究における適応・脆弱性概念にはさまざまな次元があることが分かった。例えば、脆弱性の概念は時間、領域、学問分野、誰が脆弱なのか、何に対して脆弱なのか、気候変動に対する被ばくの度合いと感度はどれくらいなのか、といった次元で定義することが可能である。また、脆弱性の要因は表1のように分類できる。

表1 脆弱性要因の分類

		学問分野	
領域	文系的 (socio-economic)	理系的(biophysical)	
内生的	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 世帯収入</li> <li>• 社会ネットワーク</li> <li>• 情報へのアクセス</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 環境条件</li> <li>• 土地被覆</li> </ul>	
外生的	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 国家政策</li> <li>• 海外援助</li> <li>• グローバリゼーション</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 台風</li> <li>• 地震</li> <li>• 海面上昇</li> </ul>	

また、適応に関しても、下記の次元で定義することが可能である：

- 何に適応するのか？
  - ▶ どんな気候変動影響？（河川が凍らなくなる；トナカイの生息地・生育方法が変わる）
- 誰が、もしくは何が適応するのか？
  - ▶ 州、町、集落、政府、トナカイ飼育者など
- どのように適応はなされるのか？
  - ▶ 目的性 (purposefulness)；タイミング；時間・空間スケール；方法（法的；技術的等）；パフォーマンス（経済効率性；公平性；効果性；導入可能性）

また、併せて重要なことは、どの程度、適応戦略に踏み込むのかということである。つまり、適応・脆弱性に関する記述・評価のみを行うのか、あるいは、適応戦略の選択肢を示すところまで踏み込むのか、ということである。

シベリアプロジェクトを、適応・脆弱性研究において国際的に位置づけるためには、適応・脆弱性概念の定義や適応戦略をどのように考えるのかを整理することが肝要である。

#### 5 おわりに

本節では、適応・脆弱性研究のレビューを行い、その概念の諸次元をまとめた。シベリアプロジェクトを、適応・脆弱性研究において国際的に位置づけるためには、適応・脆弱性概念の定義や適応戦略をどのように考えるのかを整理することが肝要である。

## 6 参考文献

- Adger, W.N. (1999). Social Vulnerability to Climate Change and Extremes in Coastal Vietnam. *World Development*, **27**(2), 249-269.
- Adger, W.N., & Kelly, P. M. (1999). Social vulnerability to climate change and the architecture of entitlements. *Mitigation and adaptation strategies for global change*, **4**(3), 253–266. Springer. Retrieved from <http://www.springerlink.com/index/M826227072036862.pdf>.
- Adger, W. Neil, Paavola, J., Huq, S., & Mace, M. J. (2006). *Fairness in Adaptation to Climate Change*. MIT Press.
- Adger, W.N., & Kelly, P. M. (1999). Social vulnerability to climate change and the architecture of entitlements. *Mitigation and adaptation strategies for global change*, **4**(3), 253–266. Springer. Retrieved from <http://www.springerlink.com/index/M826227072036862.pdf>.
- Berkes, F., & Jolly, D. (2002). Adapting to climate change: social-ecological resilience in a Canadian western Arctic community. *Conservation Ecology*, **5**(2), 18. Retrieved from [http://www.ecology.ethz.ch/education/Resilience\\_Stuff/Berkes\\_and\\_Jolly\\_2001.pdf](http://www.ecology.ethz.ch/education/Resilience_Stuff/Berkes_and_Jolly_2001.pdf).
- Burton, Ian, Huq, S., Lim, B., Pilifosova, O., & Schipper, E. L. (2002). From impacts assessment to adaptation priorities: the shaping of adaptation policy. *Climate Policy*, **2**(2), 145-159. doi: 10.3763/cpol.2002.0217.
- Ford, J. D., Keskitalo, E. C. H., Smith, T., Pearce, T., Berrang-Ford, L., Duerden, F., et al. (2010). Case study and analogue methodologies in climate change vulnerability research. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change*, **1**(June), n/a-n/a. doi: 10.1002/wcc.48.
- Füssel, H.-M., & Klein, Richard J. T. (2006). Climate Change Vulnerability Assessments: An Evolution of Conceptual Thinking. *Climatic Change*, **75**(3), 301-329. doi: 10.1007/s10584-006-0329-3.
- King, D. N. T., Skipper, a, & Tawhai, W. B. (2008). Māori environmental knowledge of local weather and climate change in Aotearoa – New Zealand. *Climatic Change*, **90**(4), 385-409. doi: 10.1007/s10584-007-9372-y.
- Marin, A. (2010). Riders under storms: Contributions of nomadic herders' observations to analysing climate change in Mongolia. *Global Environmental Change*, **20**(1), 162-176. doi: 10.1016/j.gloenvcha.2009.10.004.
- Neil Adger, W. (1999). Social Vulnerability to Climate Change and Extremes in Coastal Vietnam. *World Development*, **27**(2), 249-269. doi: 10.1016/S0305-750X(98)00136-3.
- Patt, a, & Schroter, D. (2008). Perceptions of climate risk in Mozambique: Implications for the success of adaptation strategies. *Global Environmental Change*, **18**(3), 458-467. doi: 10.1016/j.gloenvcha.2008.04.002.
- Smit, B., Burton, I., Klein, R.J.T., & Street, R. (1999). The science of adaptation: a framework for assessment. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, **4**(3), 199–213. Springer. Retrieved from <http://www.springerlink.com/index/M036620054116344.pdf>.

Smith, J.B., S.E. Ragland and G.J. Pitts. (1996). A process for evaluating anticipatory adaptation measures for climate change. *Water, Air, and Soil Pollution*, **92**, 229-238.

## おわりに

檜山 哲哉

人間文化研究機構 総合地球環境学研究所  
(シベリアプロジェクト サブリーダー)

本研究2年目（FR2）が終わろうとしている。時が経つのは早い。我々は、当初掲げたプロジェクトの目的に、どのくらいアプローチできたであろうか。本報告書をご覧頂ければ、その状況を把握して頂けるものと思う。FR2 終了（中間評価）という節目にあたり、総合地球環境学研究所（地球研）・循環プログラム主幹から頂戴したコメントの抜粋を、以下に記載しておく。

中間報告の段階で、タイトルにある「アダプテーション」についての結果がほとんどみえないので、プロジェクトの後半に向けては、それを示すためのロードマップを明確にし、設計科学的なゴールの設定も視野に入れていただきたい。本プロジェクトは、温暖化という自然変化に特に着目した研究であるが、アダプテーションを考えるうえでは、当然、社会変化も重要な条件である。また資源採取地域の移転など現代的な問題を、プロジェクト全体の中でどう整理するかの枠組みを明確に示してほしい。」

地球研では、「環境問題の根源は人間文化の問題にある」という哲学に基づき、人間と自然の相互作用環を循環・多様性・資源などの切り口から解明する認識科学とともに、未来可能な人間社会のあり方を提言するための設計科学を掲げて地球環境問題に果敢に取り組んでいる。したがって今後3年間は、グループ1（G1）とグループ2（G2）が主に進める認識科学のみならず、グループ3（G3）の研究に、益々期待が寄せられている。とはいえ、設計科学的考察や作業を、G3だけに押しつけてはならない。本プロジェクトが一丸となって、シベリアという興味深い舞台において、認識科学と設計科学を推し進めていかねばならない。この冊子にご報告頂いた強力なメンバーをもってすれば、必ずうまくいくと思っている。今後3年間、プロジェクト運営の醍醐味を存分に味わいたい。

FY2010 FR2 Research Project Report

Global Warming and the Human-Nature Dimension in Siberia: Social Adaptation to the Changes of the Terrestrial Ecosystem, with an Emphasis on Water Environments (RIHN Project C-07)

Inter-University Research Institute Corporation, National Institutes for the Humanities, Japan

Research Institute for Humanity and Nature (RIHN)

457-4 Motoyama, Kamigamo, Kita-ku, Kyoto 603-8047, Japan

Edited by Tetsuya HIYAMA

March 2011

平成 22 年度 FR2 研究プロジェクト報告

温暖化するシベリアの自然と人 ―水環境をはじめとする陸域生態系変化への社会の適応  
(地球研プロジェクト C-07)

大学共同利用機関法人 人間文化研究機構

総合地球環境学研究所 (地球研)

〒603-8047 京都市北区上賀茂本山 457 番地 4

編集：檜山 哲哉

発行：2011 年 3 月